



HAL
open science

Navigation autonome en environnements extérieurs

Simon Lacroix

► **To cite this version:**

Simon Lacroix. Navigation autonome en environnements extérieurs. Automatique / Robotique. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2006. tel-00109720

HAL Id: tel-00109720

<https://theses.hal.science/tel-00109720>

Submitted on 25 Oct 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Navigation autonome en environnements extérieurs

Synthèse des travaux de recherche réalisés
en vue de l'obtention de
l'Habilitation à Diriger des Recherches
de l'Institut National Polytechnique de Toulouse

Simon LACROIX
LAAS / CNRS
7, Avenue du Colonel Roche
31077 TOULOUSE Cedex 4
France
E-mail : Simon.Lacroix@laas.fr

Soutenue le Mercredi 7 Juin 2006 au LAAS/CNRS

Membres du Jury :

Philippe Bidaud, Laboratoire de Robotique de Paris, Rapporteur
Martial Hebert, Carnegie Mellon University, Rapporteur
Roland Siegwart, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Rapporteur
Dominique Meizel, XLIM Limoges, Examineur
Michel Maurette, CNES, Examineur
Raja Chatila, LAAS/CNRS, Examineur
Georges Giralt, LAAS/CNRS, Examineur

Table des matières

1	Activités de recherche	5
1.1	Modélisation de l'environnement	7
1.1.1	Algorithmes de base	7
1.1.2	Le problème de la localisation	10
1.1.3	Construction de modèles de l'environnement	19
1.2	Navigation autonome	25
1.2.1	Génération de déplacements locaux	25
1.2.2	Contrôle des déplacements	27
1.2.3	Stratégies de navigation	28
1.3	Coopération multi-robots	30
1.4	Développements expérimentaux	33
1.4.1	Le robot Lama.	33
1.4.2	Le robot Dala.	34
1.4.3	Le ballon dirigeable Karma.	34
1.4.4	Le drone Lhassa.	36
2	Prospective : robotique aéro-terrestre	38
2.1	Contexte : robotique aéro-terrestre	38
2.2	Aspects relatifs à la modélisation de l'environnement	39
2.3	Aspects décisionnels, coopération multi-robots	41
2.4	Méthodes et moyens	42
A	Curriculum Vitæ	43
B	Autres activités	44
B.1	Activités d'encadrement	44
B.1.1	Encadrement de thèses	44
B.1.2	Encadrement de DEA et stages de fin d'études	45
B.1.3	Autres encadrements	46
B.2	Collaborations académiques	47
B.2.1	Collaborations informelles	47
B.2.2	Collaborations dans le cadre de projets	47
B.3	Activités contractuelles	50
B.4	Activités d'évaluation	52
B.4.1	Evaluation de thèses	52
B.4.2	Évaluation de projets	52

B.5 Activités de diffusion de l'information scientifique	53
C Liste exhaustive des publications	54

Présentation

Ce rapport synthétise mes activités de recherche au sein du groupe Robotique et Intelligence Artificielle du LAAS, depuis que je l'ai intégré en tant que chargé de recherches le 1er Février 1996.

Il est composé de trois parties :

- La première partie est la plus volumineuse : elle résume l'ensemble de mes contributions scientifiques et présente les perspectives de travaux futurs,
- La deuxième partie présente le programme de recherches dans lequel mes activités actuelles s'inscrivent,
- Enfin quelques annexes constituent la dernière partie : curriculum vitæ, bilan des autres activités (encadrement, collaborations, activités partenariales, d'évaluation et de diffusion), liste exhaustive des publications.

Chapitre 1

Activités de recherche

Introduction

Contexte. Mon activité de recherche concerne la robotique mobile autonome, et s’inscrit plus particulièrement dans le contexte de la robotique dite d’intervention, en milieux extérieurs (“field robotics”). L’objectif est de doter des robots terrestres ou aériens de capacités de réalisation autonome de missions complexes. Un large spectre d’applications potentielles est considéré : exploration scientifique (planétaire [1, 70] ou terrestre), déminage, intervention en milieu hostile, cartographie, reconnaissance et surveillance d’environnements...

L’ensemble de mes travaux s’inscrivent dans le cadre d’un projet interne au groupe Robotique et Intelligence Artificielle du laboratoire, dont j’assure l’animation depuis 1999 (“Robotique en environnements naturels” - www.laas.fr/~simon/eden). L’objectif de ce projet est de fédérer et capitaliser les activités de recherche relatives aux robots dans des environnements extérieurs non structurés, et notamment de les valider à bord de plateformes dans des conditions réalistes. *L’intégration expérimentale* des développements réalisés est donc un souci permanent de mon activité : une bonne part de mes travaux est consacrée à la spécification et au développement de plateformes, ainsi qu’à la réalisation de démonstrations intégrées avec ces plateformes (figure 1.1).

Récemment, mes travaux ont évolué vers la robotique aérienne, tout en maintenant une activité autour de la robotique terrestre : je suis le “porteur” de l’axe stratégique “Robotique Aérienne et Terrestre”, un des 16 axes affichés par le laboratoire pour l’horizon 2006-2010. Enfin, j’effectue une grande partie de mes travaux dans le contexte de collaborations avec d’autres laboratoires ou partenaires industriels.

Axes de recherches. Dans ce contexte, mon activité était originalement essentiellement focalisée autour des différents aspects liés à la perception pour la navigation d’un robot terrestre [2] : cela va de l’acquisition des données à la modélisation autonome de l’environnement, ce qui nécessite l’étude de problèmes ayant trait à la fusion multisensorielle, à la fusion de données acquises en différentes positions, et à l’estimation de la position du robot à partir des données acquises (localisation).

Mais ces aspects sont aussi étroitement liés aux déplacements du robot : en effet, les activités de perception doivent être considérées aussi bien lors de la planification des déplacements que lors de leur exécution [8]. Ainsi le contrôle et la planification des activités perceptuelles du robot, considérés conjointement à la planification et l’exécution des déplacements est un objectif essentiel de l’ensemble de mes travaux.



FIG. 1.1 – Les robots qui sont le support de développement de nos travaux. De gauche à droite : les rovers Lama et Dala, le ballon dirigeable Karma et le drone Lhasa

Si j'ai principalement continué à contribuer sur des problèmes liés à la perception, à la modélisation de l'environnement et à la localisation des robots, j'ai aussi travaillé sur des méthodes de génération et de contrôle des déplacements, et la supervision de l'ensemble de ces processus. Ces activités permettent de se focaliser autour des problèmes posés par l'intégration, thème dont je pense qu'il est l'essence même de la robotique : intégration d'un ensemble de représentations hétérogènes de l'environnement, intégration d'algorithmes de localisation, intégration entre perception et action, intégration de différents modes de déplacement, intégration de l'ensemble des processus fonctionnels avec les processus décisionnels, et plus récemment intégration multi-robots.

Évolutions. Si jusqu'en 2000 l'ensemble des mes travaux était dédié à des problèmes posés par des robots terrestres, je me suis depuis beaucoup investi dans l'étude des différents problèmes posés par l'autonomie des robots aériens. J'ai initié un projet de développement d'un ballon dirigeable autonome [63], et notamment étudié dans ce contexte la modélisation de l'environnement à partir d'images acquises à basse altitude. Plus récemment, dans le cadre d'une collaboration industrielle, nous avons acquis un drone, qui sera le support de travaux sur la coopération entre plusieurs engins aériens. L'objectif est de travailler sur les problèmes posés la coopération entre robots terrestres et aériens : des premiers travaux sur les aspects décisionnels liés à la coopération ont été réalisés [13].

Plan. Mes activités sont présentées suivant les grands axes de recherches sur lesquels je contribue, et une section est dédiée au développement et à l'exploitation des moyens expérimentaux :

- La section 1.1 présente les travaux sur la modélisation d'environnements naturels,
- la section 1.2 présente les travaux sur la génération de déplacements,
- la section 1.3 présente les travaux sur la coopération multi-robots,
- et la section 1.4 présente les robots qui sont le support d'intégration et d'expérimentation de nos développements.

Remarque : seules quelques références bibliographiques représentatives sont référencées dans le texte – la liste complète des références figure en annexe C.

1.1 Modélisation de l'environnement

La construction de modèles de l'environnement est bien entendu essentielle à la réalisation d'une machine intelligente : c'est par leur biais que la machine appréhende l'état du monde, et peut donc y *adapter* la résolution et l'exécution de tâches pour mener à bien une mission. Dans le contexte de la navigation autonome, nous pouvons distinguer trois grands types de fonctionnalités qui exploitent un modèle de l'environnement :

- **Génération de déplacements** : Quelques soient les techniques retenues pour déterminer des déplacements à effectuer, elles reposent toujours sur une représentation de l'environnement. En effet, les environnements extérieurs étant non structurés, même les techniques les plus simples de génération de déplacements réactives ne peuvent être appliquées la base de simples données brutes (proximètres ou nappe laser plane par exemple) comme c'est le cas en environnements structurés : il est toujours nécessaire d'analyser les données acquises et d'en construire une représentation de l'environnement.
- **Planification de tâches** : les tâches qu'il est nécessaire de planifier et d'exécuter dans le contexte de la navigation autonome concernent les *stratégies* de déplacement et de perception. Ces deux tâches sont intimement liés entre elles, et consistent essentiellement à déterminer des sous-buts intermédiaires à rallier ainsi que les activités perceptuelles à exécuter durant les déplacements. La construction de représentations riches et globales de l'environnement est bien entendu indispensable à leur planification.
- **Localisation** : Nous verrons dans le paragraphe 1.1.2 que la capacité pour le robot de se localiser est fondamentale pour la navigation autonome, et qu'elle requiert la construction de représentations spécifiques.

Il est évident que ces fonctionnalités exploitent des informations de natures variées quant à l'environnement, qui sont extraites à partir de différents types de données grâce à des algorithmes variés. Il nous paraît illusoire d'espérer disposer d'une méthode de modélisation "universelle", capable de produire l'ensemble des informations requises par ces fonctionnalités : nous favorisons donc le développement de représentations *hétérogènes*, produites par des algorithmes dédiés, un peu à la manière des systèmes d'information géographiques, dans lesquelles coexistent différentes "couches" sémantiques (élévation du terrain, réseau routier, bâtiments...). Se pose alors le problème du maintien de la cohérence entre ces différentes représentations : cela passe d'abord par le maintien de la *cohérence spatiale* entre des représentations et entre elles, ce qui est assuré par la connaissance à tout moment de la position du robot.

Mes contributions dans le thème de la modélisation de l'environnement portent sur les trois points suivants :

- Algorithmes de base (acquisition de données, calibration),
- Localisation, et particulièrement cartographie et localisation simultanées,
- Et enfin construction de modèles de l'environnement.

1.1.1 Algorithmes de base

Stéréovision

Dès mon entrée au laboratoire en tant que chargé de recherches, j'ai implémenté un algorithme de stéréovision optimisé par corrélation de pixels, de la phase de rectification des images à la phase de détermination par triangulation des coordonnées 3D des pixels appariés. Le besoin était évident pour

la réalisation de démonstrations de navigation autonome, et l’algorithme a été très largement exploité depuis.

L’aspect original de notre contribution pour cet algorithme a d’abord porté sur une étude précise des incertitudes sur les coordonnées des points 3D produits [79]. L’analyse statistique d’images a permis de constater qu’il existait une forte corrélation entre la forme du pic de corrélation autour de son maximum et l’écart type sur l’estimation de la profondeur. Cette analyse nous a d’une part permis de déterminer un modèle prédictif de la stéréovision, qui donne l’espérance de l’erreur en fonction de la distance des pixels perçus et des variations de luminosité dans leur voisinage, et permet d’autre part de déterminer *en ligne* (lors de la phase de corrélation) l’incertitude sur la profondeur de chacun des points 3D perçus (figure 1.2). Ceci a pu être exploité pour différents algorithmes de localisation du robot et de modélisation de l’environnement.

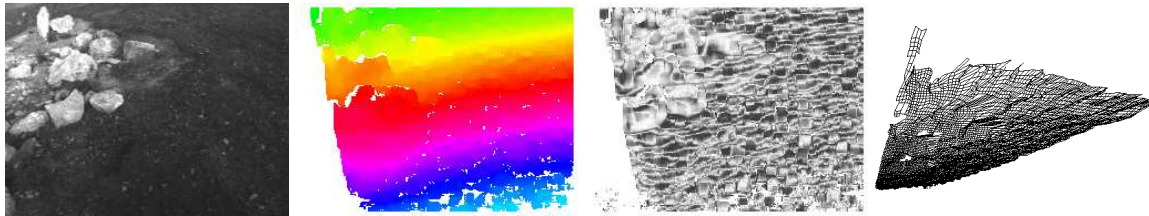


FIG. 1.2 – Un résultat de l’algorithme de stéréovision sur une image acquise à bord de Lama. De gauche à droite : une image de la paire stéréoscopique, l’image de disparités produite lors de la phase de corrélation (les niveaux de gris représentent la profondeur des pixels perçus), écarts types estimés sur la disparité (le moiré qui apparaît est bien expliqué par notre analyse), et image de points 3D reconstruite.

Ensuite, des développements ont consisté à améliorer son comportement dans des environnements moins bien texturés (intérieurs de bâtiments par exemple, ou scènes extérieures particulièrement difficiles - ses résultats ont été analysés dans des images acquises en Antarctique [42]). Une méthode qui évalue un ensemble d’hypothèses d’appariement et choisit parmi elles les plus plausibles en fonction d’un critère de continuité des surfaces a été proposée [31] : elle permet d’améliorer considérablement les résultats de l’algorithme (augmentation du nombre d’appariements produits et élimination des appariements aberrants - figure 1.3).

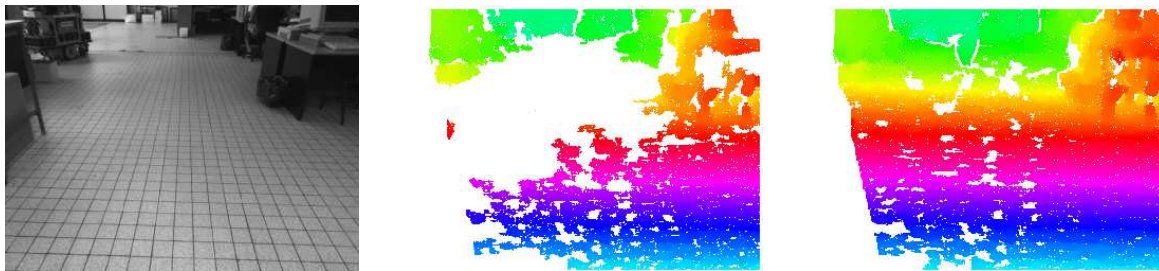


FIG. 1.3 – Illustration des résultats de l’amélioration de la stéréovision dans un cas particulièrement difficile (motifs répétitifs). De gauche à droite : image gauche originale, image de disparités après application de l’algorithme classique, et image de disparités après application d’un critère de continuité des surfaces.

Cet algorithme a été porté sur différents systèmes d’exploitation, et a notamment été intégré à bord des robots du laboratoire Lama et Dala et du ballon dirigeable Karma. Il a aussi été transmis à l’Autonomous Systems Lab de l’EPFL et à la Nasa Ames, où il a été respectivement exploité par les robots Solero et Gromit, et au département Matériaux l’École de Mines d’Albi, où il a permis d’évaluer la faisabilité d’une technique de mesure de déformations de matériaux basée sur la stéréovision [47].

Mon collègue Michel Devy l'a exploité et y a apporté des améliorations dans le contexte de deux projets Predit (pour déterminer la présence et l'attitude d'occupants dans un habitacle de voiture et pour détecter des obstacles sur route), et dans le contexte de collaborations avec les sociétés Siemens Automotive et Renault.

Détection et mise en correspondances de points d'intérêt

Les points d'intérêt (et plus précisément les points dits de Harris) ont suscité de nombreuses contributions dans la communauté de la vision : comme ils possèdent de bonnes propriétés d'invariance, ils peuvent être exploités pour plusieurs applications : indexation d'images, reconnaissance d'objets... En robotique, ils peuvent notamment être exploités comme amers pour la localisation (voir section 1.1.2).

Nous avons développé une technique de mise en correspondance de points d'intérêts détectés dans deux images acquises de points de vue arbitraires [39], qui s'avère extrêmement robuste et performante, y compris vis-à-vis de changements d'échelle importants si une estimée initiale en est connue (figure 1.4). Cette technique est désormais une base sur laquelle de nombreuses fonctionnalités peuvent être définies : elle a été appliquée au suivi de cible quelconque (et transféré à la DGA pour évaluation dans ce contexte), mais surtout pour l'estimation visuelle du mouvement et la cartographie et localisation simultanée. Elle a aussi été transférée au CNES, afin d'être évaluée dans le contexte de la localisation visuelle d'un robot d'exploration planétaire.

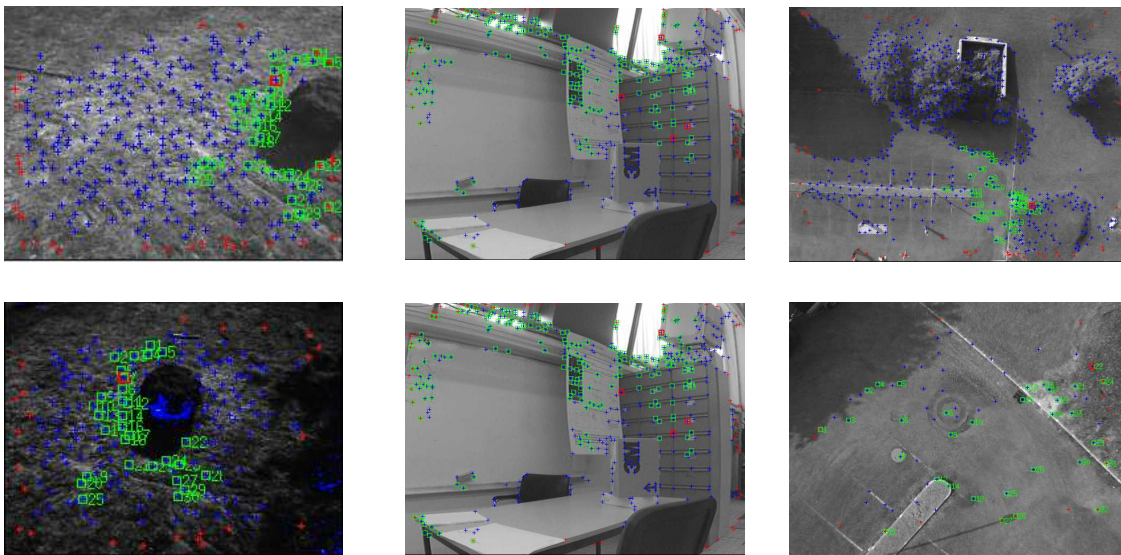


FIG. 1.4 – Trois exemples de résultats de l'algorithme de mise en correspondance de points d'intérêts. De gauche à droite : cas d'images acquises en extérieur, cas d'images acquises en intérieur, et cas d'images aériennes avec un grand changement d'échelle. Les points correctement appariés sont notés par un carré vert, les carrés rouges représentent les mauvais appariements éliminés par vérification de la contrainte épipolaire.

Vision panoramique

La vision panoramique présente indiscutablement de nombreux intérêts pour la robotique, et j'ai initié au laboratoire des travaux dans ce domaine vers l'année 2000. Ces travaux ont été menés dans le cadre de la thèse de Joël Gonzalez, dans le contexte d'un projet "Jeunes chercheurs" du GdR ISIS que j'ai animé, et tout récemment dans le cadre du projet "Caviar" supporté par l'ANR.

Calibrage. Dans le but d’exploiter la vision panoramique pour obtenir des informations tridimensionnelles, il est nécessaire de connaître les paramètres du modèle géométrique de formation des images. Nous avons proposé un tel modèle qui inclut les paramètres intrinsèques du système (surfaces des miroirs et paramètres intrinsèques de la caméra), et surtout les erreurs d’alignement entre les différents éléments constituant l’objectif panoramique. Nous avons explicité un tel modèle pour une caméra catadioptrique composée d’un miroir parabolique et d’un miroir sphérique (figure 1.5) : ce modèle est aussi applicable aux caméras composées d’un miroir parabolique et d’une lentille télécentrique, qui sont très répandues. Une méthode de calibrage itérative basée sur des estimées initiales d’un modèle simplifié, auquel sont ajoutées progressivement les paramètres supplémentaires a été mise au point [4]. Elle a montré des résultats bien meilleurs que pour des modèles ignorant les paramètres de désalignement entre les différents éléments du système.

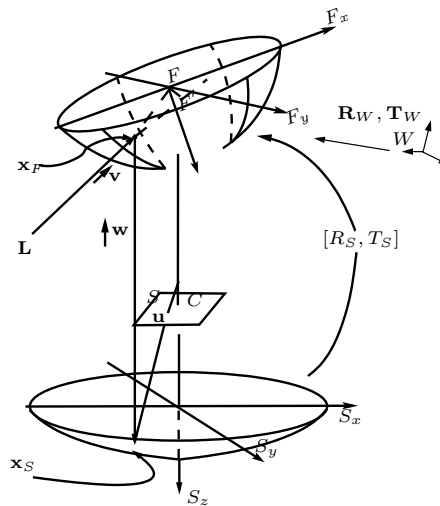


FIG. 1.5 – Modèle géométrique d’une caméra panoramique composée d’un miroir parabolique et d’un miroir sphérique, avec considération des désalignements entre ces deux éléments.

Stéréovision panoramique. La géométrie particulière des caméras panoramiques définit des épipolaires dont les équations ne sont pas triviales. Nous avons proposé un algorithme de rectification des images d’un banc stéréoscopique panoramique, qui fournit des images dans lesquelles les épipolaires sont des lignes parallèles, ce qui permet l’application d’un algorithme optimisé de stéréovision par corrélation des pixels ([4], figure 1.6).

1.1.2 Le problème de la localisation

La capacité pour se localiser est fondamentale pour la navigation autonome d’un robot. Elle est d’une part nécessaire à l’exécution de missions globales, qui sont pour la plupart définies en termes de positions à rallier où de zones à explorer, elle est d’autre part nécessaire à la cohérence spatiale des différentes représentations de l’environnement construites, et enfin elle est requise pour contrôler l’exécution des déplacements planifiés.

Ce problème se pose de manière cruciale en environnements naturels, où les capteurs odométriques fournissent des données très erronées, et où il n’existe pas de primitives géométriques aisément détectables (droites et plans) par rapport auxquelles le robot peut se repérer. Enfin, les systèmes de

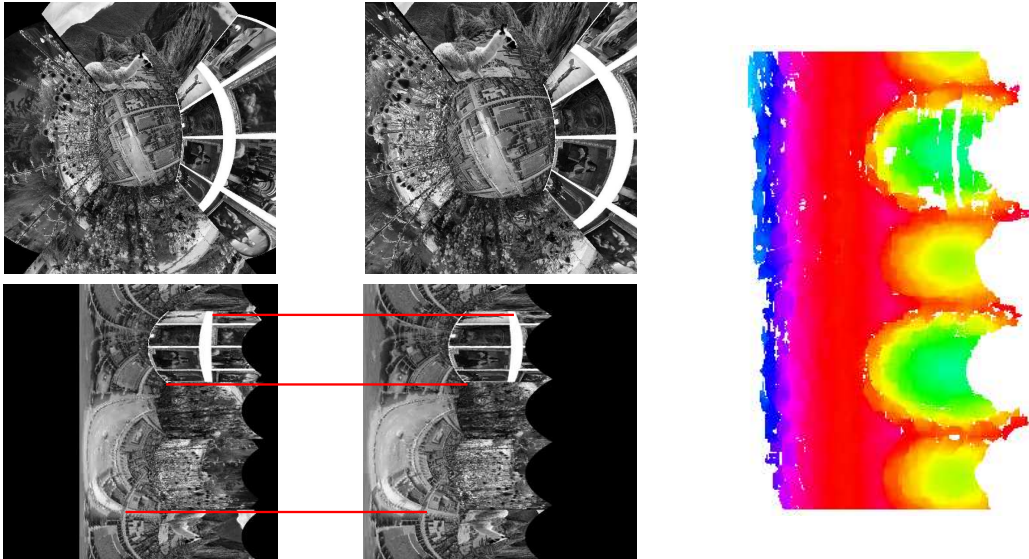


FIG. 1.6 – Résultat de l’algorithme de rectification avec une configuration du banc stéréoscopique où les caméras sont l’une au dessus de l’autre. En haut à gauche, les images originales, En bas à gauche, les images rectifiées (des lignes épipolaires horizontales sont tracées). A droite, image de disparités correspondante.

localisation par satellite n’y sont pas forcément toujours opérant (dans le contexte de l’exploration planétaire bien entendu, mais aussi dans des canyons urbains, et dans les contextes militaires où des systèmes de brouillage peuvent être déployés).

Convaincu de l’importance du problème de la localisation, et du fait que sa résolution briserait un des grands verrous qui limitent le développement de robots autonomes, j’ai consacré beaucoup de temps à travailler sur sa résolution au cours de ces dernières années (encadrement des thèses d’Anthony Mallet, Joël Gonzalez, Il-Kyun Jung et Thomas Lemaire, du post-doctorat de Pierre Lamon, et de divers stagiaires et visiteurs).

Ce problème est de plus exemplaire, car sa résolution met en œuvre trois grands thèmes scientifiques différents : (i) perception et modélisation (pour extraire, mettre en correspondance et parfois identifier des éléments de l’environnement), (ii) filtrage stochastique (manipulation de données géométriques imprécises, gestion d’un ensemble de repères positionnés plus ou moins précisément), et (iii) planification de perception. En ce sens, les fonctions de localisation sont au cœur de l’intégration du système : non seulement elles requièrent la synchronisation de nombreuses fonctions de types variés, mais surtout elles conditionnent la capacité du robot à construire des représentations *spatialement cohérentes* de son environnement, et donc son autonomie.

Une typologie des méthodes de localisation.

Il existe une vaste gamme d’algorithmes de localisation, qui ont des propriétés assez différentes et complémentaires. On peut les distinguer selon la typologie suivante [36] :

- **Estimation de mouvement** : Il s’agit des techniques qui intègrent des données à très haute fréquence, sans les mémoriser, et qui estiment des déplacements élémentaires. On trouve dans cette catégorie les techniques de localisation inertielle et odométriques par exemple, mais aussi des techniques d’estimation visuelle du mouvement.
- **Recalage** : Par essence, comme elles ne mémorisent aucune information sur l’environnement à long terme, les techniques précédentes cumulent les erreurs qu’elles commettent, et produisent

donc des estimations de position dont l'erreur n'est pas bornée. C'est grâce à des techniques de recalage, qui se basent sur la mémorisation d'éléments particuliers de l'environnement et leur mise en correspondance lors des déplacements que l'on peut limiter cet accroissement d'erreur. Ces techniques sont désormais bien connues sous l'acronyme SLAM, pour "Simultaneous Localisation And Mapping".

- **Localisation absolue** : Nous désignons par ce terme les algorithmes qui sont capables de mettre en correspondance un modèle de l'environnement avec un modèle initialement connu (par l'intermédiaire d'imagerie aérienne par exemple), dont la cohérence spatiale est garantie.

La résolution du problème de la localisation exige donc l'intégration de nombreuses fonctionnalités de natures très diverses, qui vont de l'estimation de mouvement à la reconnaissance d'objets naturels et de lieux. Elle fait appel à différents types de processus :

- *Perception* : Il s'agit d'extraire des données des éléments pertinents pour la localisation, et de les mettre en correspondance au cours des déplacements du robot ;
- *Estimation* : Il faut ensuite traiter les mises en correspondances pour en déduire ou affiner une estimée de la position du robot. Les techniques de filtrages stochastiques sont les plus utilisées pour cela, mais d'autres théories de l'estimation (ainsi les techniques ensemblistes) sont aussi applicables ;
- *Contrôle* : Enfin, le problème de la localisation peut nécessiter le contrôle de l'acquisition de données, voire même influencer les déplacements à effectuer.

Nous décrivons ici les différentes techniques de localisation que nous avons développées, suivant cette typologie.

Estimation du mouvement

Odométrie 3D. L'odométrie est une méthode de localisation extrêmement employée en robotique, mais dans la plupart des cas pour des robots évoluant sur des sols plans. En environnements extérieurs, cette hypothèse n'est plus vérifiée, et des informations sur l'attitude du robot peuvent être exploitées pour connaître ses 6 paramètres de positionnement. Nous avons développé une telle méthode pour le robot Lama, à partir des données produites par les codeurs optiques de rotation des roues, d'un gyromètre à fibre optique et des deux inclinomètres (les mouvements du robots sont suffisamment lents pour que les inclinomètres fournissent une estimée correcte de l'attitude du robot - les hautes fréquences correspondant aux vibrations sont simplement éliminées par filtrage). Elle a aussi été adaptée au robot Dala, pour lequel les angles d'attitude sont déterminés grâce à une centrale inertielle 6 axes. La méthode a été améliorée pour Lama grâce à des travaux portant sur le contrôle de locomotion (voir section 1.2.2), qui permettent de limiter l'apparition de glissements en analysant les courants consommés et la configuration du châssis du robot [26].

Estimation visuelle du mouvement. Nous avons développé une méthode d'estimation du mouvement basée sur l'appariement entre points extraits d'images stéréoscopiques, l'appariement étant réalisé grâce à une fonctionnalité de suivi de pixels dans la séquence d'images acquise entre les deux instants où est effectuée la procédure de stéréovision [41] (figure 1.7). Les premières implémentations de cette fonctionnalité d'estimation visuelle du mouvement ont permis de déterminer une estimation des 6 paramètres d'un déplacement sur plusieurs centaines de mètres avec une très bonne précision, et ce quelque soit le type de terrain ou évolue le robot, notamment en terrain accidenté, où l'odométrie est particulièrement peu fiable.

Une première version de cette méthode a été transférée au CNES dans le cadre d'un contrat en 2001 - remarquons qu'une méthode tout à fait analogue a été embarquée à bord des rovers martiens

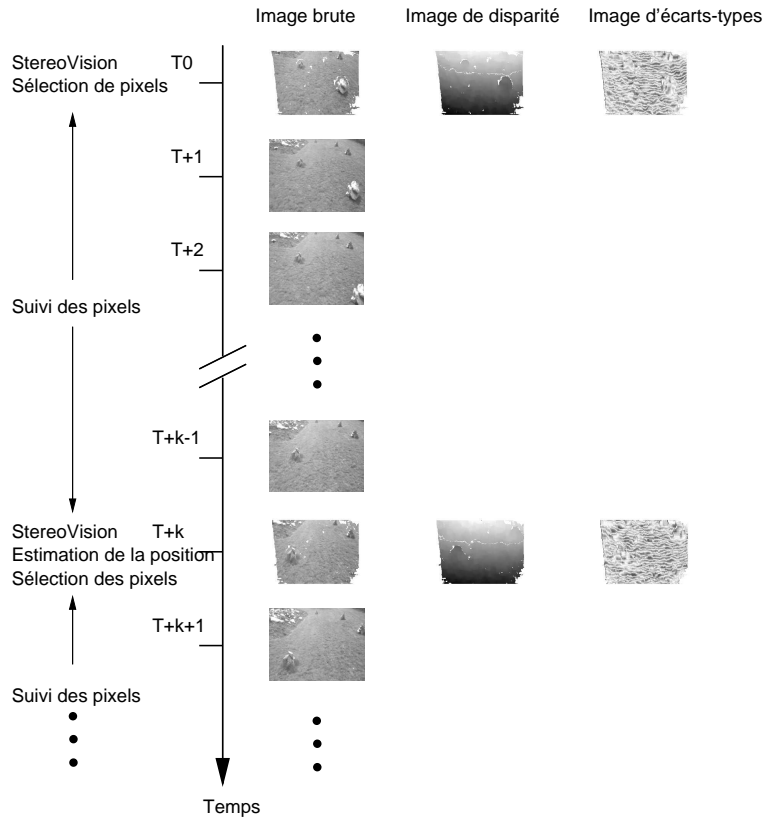


FIG. 1.7 – Principe de la première version de la méthode d’estimation visuelle du mouvement : au temps T_0 , un algorithme de corrélation calcule une image de disparité à partir d’une paire stéréo. Un ensemble de pixels à suivre est sélectionné. Entre T_1 et T_k , les pixels ainsi choisis sont suivis dans la séquence d’images vidéo. Après le calcul de l’image de disparité à l’instant T_k , les couples de points 3D $\{P_0^i, P_k^i\}$ sont formés et le déplacement $T_0 \rightarrow T_k$ calculé. Un filtre de sélection rejette les points aberrants, permettant ainsi de raffiner l’estimation, et la séquence recommence.

Cette méthode a été ensuite sensiblement améliorée :

- D’une part les appariements entre deux images prises à deux positions différentes sont désormais réalisés par l’algorithme robuste et efficace de mise en correspondance de points d’intérêts, présenté en section 1.1.1). Le même algorithme est aussi exploité pour déterminer la profondeur des points par stéréovision, évitant ainsi l’appel systématique à la procédure de stéréovision dense.
- D’autre part, une technique robuste d’estimation des paramètres du déplacement à partir des points mis en correspondance a été introduite. Cette méthode estime aussi les variances des paramètres estimés. Une comparaison avec d’autres approches (techniques d’ajustement de faisceaux, beaucoup plus coûteuse) a aussi été réalisée [14].

La nouvelle version des algorithmes a été transférée à l’EPFL, et a aussi suscité un nouveau transfert vers le CNES dans un contexte contractuel en 2005.

Cartographie et Localisation Simultanées (SLAM)

Le problème dit “SLAM” est au coeur de la navigation autonome, et a connu ces dernières années un grand regain d’intérêt. Sa résolution requiert l’implémentation des quatre processus suivants :

1. **Détection des amers.** Cela consiste à détecter dans les données perçues les éléments de l'environnement qui sont saillants, aisés à observer et dont la position relative au robot peut être déterminée. Ce processus dépend bien entendu des capteurs utilisés et du type d'environnement dans lequel le robot évolue : il s'agit d'un processus de *perception*, qui représente les amers dans une structure de donnée spécifique.
2. **Mesures.** Cela consiste en deux processus différents :
 - Mesure des déplacements du robot. Une telle estimée peut être fournie par les capteurs de mouvement ou de positionnement, par un modèle dynamique de l'évolution du robot qui permet de prédire les mouvements en fonction des commandes de déplacement données au robot, ou bien par des hypothèses sur le comportement du robot, telles qu'un modèle de vitesse constante.
 - Mesure des positions des amers. C'est l'estimation de la position des amers par rapport à la position du robot depuis laquelle ils sont observés (note : cette position n'est pas toujours estimée complètement, ainsi une caméra ne perçoit que des coordonnées angulaires)
3. **Association de données.** Les amers ne sont utiles pour estimer la position du robot que si ils sont observés de différentes positions. Il est donc nécessaire de pouvoir mettre en correspondance les amers perçus de différentes positions, sans quoi les positions du robot et des amers deviennent rapidement incohérentes.
4. **Estimation.** Il s'agit du coeur de tout processus SLAM, qui consiste à intégrer les différentes estimations relatives pour produire une estimée de la position du robot et des amers dans un repère global. Différents formalismes ont été proposés pour cette étape : les approches stochastiques sont les plus utilisées et sont celles qui ont mené aux résultats les plus intéressants.

Nous avons d'abord étudié une alternative aux processus d'estimation stochastiques pour le problème du SLAM : la théorie d'estimation ensembliste présente en effet l'intérêt de ne pas nécessiter de modèles précis des erreurs de mesures, qui sont parfois délicats à établir. Avec Mauro Di Marco, doctorant à l'université de Florence dont j'ai encadré le séjour de 6 mois au laboratoire [10], nous avons proposé une solution dans un cas simple où un robot évolue sur un plan, et dont le cap est connu (2 paramètres de position). Malheureusement, la complexité algorithmique de ces méthodes est exponentielle en le nombre de dimensions de la position du robot : elles ne sont en pratique pas applicables au cas d'un robot évoluant dans l'espace (6 paramètres de positionnement), et ces travaux n'ont pas été poursuivis.

Nos contributions les plus importantes dans ce thème ont plutôt porté sur le développement de solutions au problème du SLAM à partir de vision, stéréoscopique dans un premier temps, et plus récemment monoculaire. L'objectif est notamment d'augmenter le rôle de la perception dans la résolution du problème, ce qui permet notamment d'aborder l'association des données dans de meilleures conditions.

SLAM à partir de stéréovision. Sur la base de la méthode d'estimation visuelle du mouvement, nous avons proposé une méthode de cartographie et localisation simultanée exclusivement basée sur la stéréovision : les amers sont les points d'intérêt appariés dans les images, leurs coordonnées 3D fournies par la stéréovision étant utilisées pour estimer leur position et les déplacements du robot grâce à un filtrage de Kalman étendu. Les efforts ont particulièrement porté sur une estimation robuste des erreurs : erreurs de prédiction dues à la technique d'estimation du mouvement, et erreurs d'observation dues à la mise en correspondance des amers.

Initialement développée dans le contexte de la cartographie à partir d’images aériennes acquises à très faible altitude, la méthode est parfaitement adaptée aux cas des robots terrestres, en environnements intérieurs ou extérieurs. Elle donne d’excellents résultats, et ses différents développements ont été largement publiés [24, 25]. Il s’agit d’une des premières contributions dans la littérature au problème SLAM exploitant de la vision dans un contexte où la position du robot évolue en 3D (6 paramètres de placement). La figure 1.8 présente une trajectoire d’environ 200m estimée par cette technique.

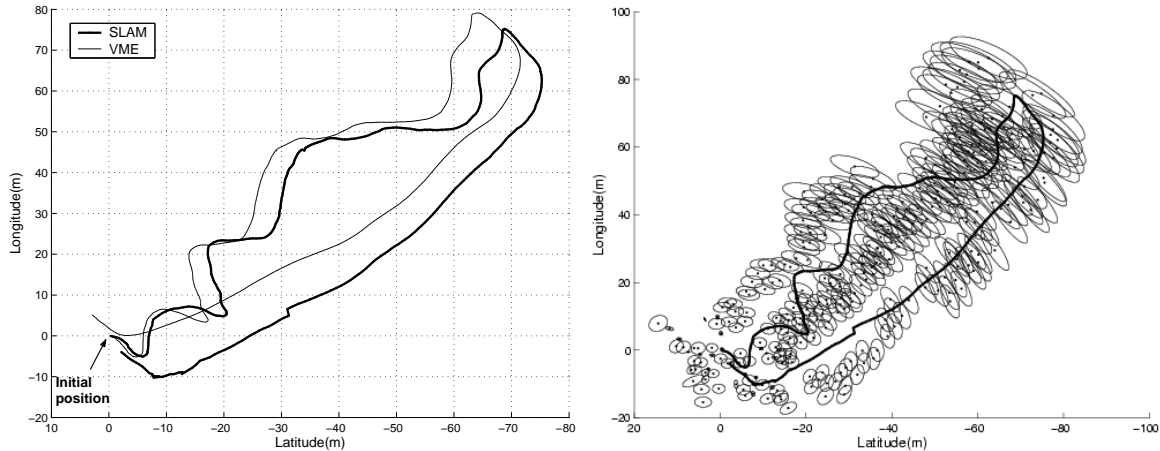


FIG. 1.8 – Reconstitution d’une trajectoire effectuée par le ballon dirigeable Karma, à partir de 400 paires d’images stéréoscopiques. En haut à gauche : comparaison entre la trajectoire fournie par une technique d’estimation du mouvement et l’approche “SLAM”. A droite, positions des amers détectés (les ellipses sont grossies d’un facteur 40).

SLAM à partir d’images monoculaires. Si cette approche est particulièrement bien adaptée aux robots terrestres dotés de stéréovision, elle l’est en fait bien moins pour des robots aériens : il est en effet nécessaire d’avoir un banc stéréoscopique d’une largeur suffisante pour que des estimées de la profondeur des points d’intérêt soit possible (ainsi le banc stéréoscopique du ballon dirigeable Karma a une largeur de $3.30m$). Dans le cadre de la thèse de Thomas Lemaire, nous étudions donc la possibilité de développer une approche SLAM à partir de vision monoculaire. Hors, dans le cas de la vision monoculaire, les amers sont observés *partiellement*, une image ne contenant pas l’information de profondeur. Afin de compléter l’observation de l’état des amers, notre stratégie consiste à approcher la fonction de densité de probabilité de profondeur des amers par une somme de gaussiennes (technique analogue à du filtrage particulaire), dont un processus de sélection exploitant plusieurs images permet de choisir la meilleure (figure 1.9) : l’amer peut alors être ajouté à la carte, et un filtre de Kalman étendu met à jours les différentes estimations [16]. Contrairement au cas de la stéréovision où le problème est résolu *exclusivement* à partir de vision, il est cette fois nécessaire de disposer d’informations supplémentaires : nous exploitons des informations sur le mouvement du robot, telles que fournies par un GPS ou une centrale inertielle. Les résultats obtenus sont très encourageants (figures 1.11 et 1.10).

Recalage par indexation d’images panoramiques

Nous avons développé une technique d’indexation d’images panoramiques à partir d’attributs globaux, qui permet de localiser le robot lorsqu’il passe par une zone préalablement traversée [32]. Le

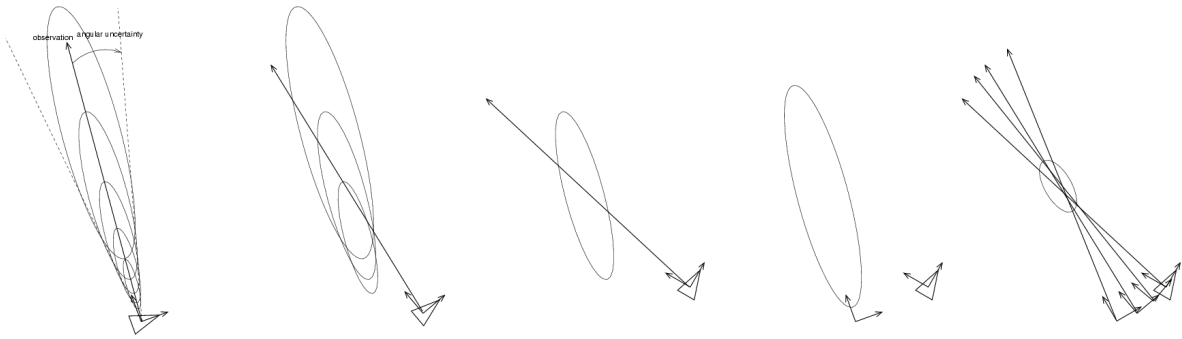


FIG. 1.9 – Processus d'initialisation et d'insertion d'un amer. De gauche à droite : la somme de gaussiennes est initialisée dans le repère robot ; les observations suivantes permettent de supprimer des gaussiennes ayant une faible vraisemblance. Lorsqu'une unique hypothèse est obtenue, l'amer est exprimé dans le repère de la carte, enfin les observations précédentes sont incorporées dans le filtre de Kalman afin d'affiner l'estimée de la position de l'amer.

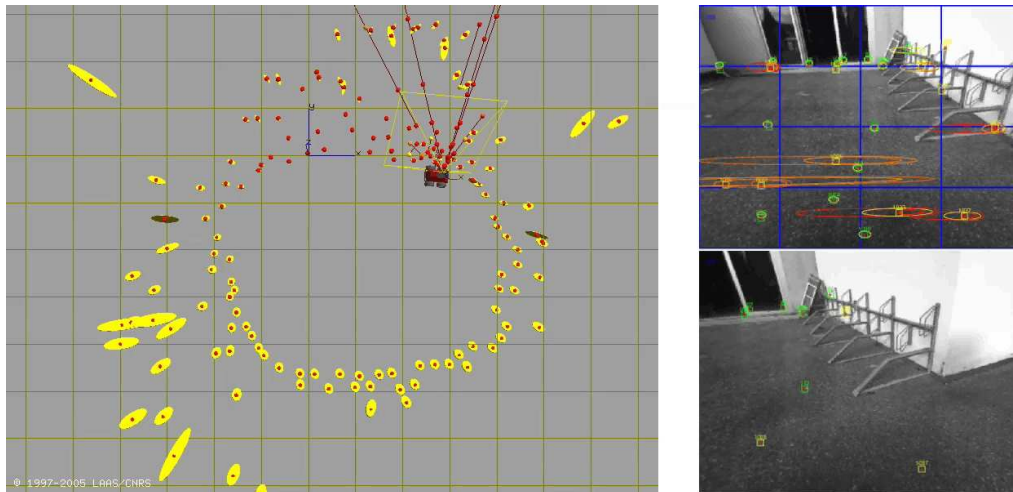


FIG. 1.10 – À gauche : amers cartographiés à l'issue d'une trajectoire circulaire (ellipses jaunes). Les rayons correspondent aux amers en cours d'initialisation, pour lesquels les différentes hypothèses sont représentées par des ellipses dans l'image courante, en haut à droite. Dans cette même image, les carrés verts représentent les amers cartographiés, en bas à droite figurent les amers détectés lors du premier passage du robot qui sont perçus dans l'image courante.

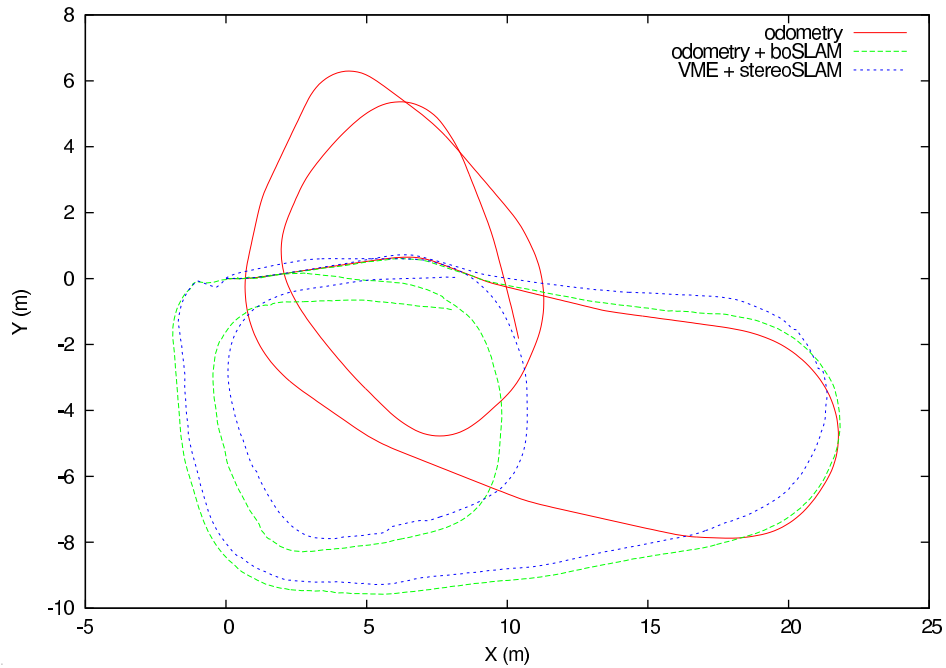


FIG. 1.11 – Comparaison de différentes estimées de position lors d’une trajectoire en boucle pour le robot Dala : odométrie (en rouge, rapidement erronée), SLAM à partir de stéréovision (bleu), et SLAM à partir de vision monoculaire (“Bearing-Only SLAM” - boSLAM, en vert).

principe est de calculer et de mémoriser des caractéristiques des images acquises lors des déplacements du robots (histogrammes de dérivées gaussiennes). Quand le robot traverse une zone préalablement modélisée, les caractéristiques perçues sont mises en correspondance avec l’ensemble des caractéristiques mémorisées, permettant ainsi de faire de la reconnaissance de lieux, et d’associer la position courante à la position de l’image mémorisée la plus semblable (figure 1.12). Cet algorithme de localisation fournit une estimée de position qualitative, et nos efforts portent actuellement sur son intégration avec une approche SLAM : la position estimée par indexation d’images peut notamment servir à faciliter la mise en correspondance des amers cartographiés.

Localisation absolue. Des premiers travaux ont été effectués en collaboration avec le CesBio pour mettre en correspondance des images aériennes très haute résolution acquises par le ballon dirigeable Karma avec des images aériennes classiques ou des images satellites. Les changements d’échelle étant très grands, la répétabilité des points d’intérêts n’est plus suffisante pour que l’algorithme exploité pour l’estimation de mouvement donne des résultats satisfaisants. Les travaux de stage de Salil Jain et Bertrand Chabaud ont consisté à déterminer une méthode qui fonctionne avec des tels changements d’échelle. Des hypothèses d’appariements entre points sont générées, et une technique de relaxation permet de confirmer ou d’invalider ces hypothèses. Quelques résultats ont pu être obtenus sur des images où le changement d’échelle est réalisé “en simulation”, par un algorithme de réduction d’images par moyennage gaussien. Sur des images réelles, les résultats ne sont malheureusement pas encore satisfaisants, essentiellement à cause des propriétés radiométriques qui sont très sensiblement différentes d’une image à l’autre.

Nous avons aussi étudié la possibilité de résoudre ce problème en exploitant un modèle numérique de terrain : nous avons d’abord évalué la possibilité de mettre en correspondance un modèle numérique

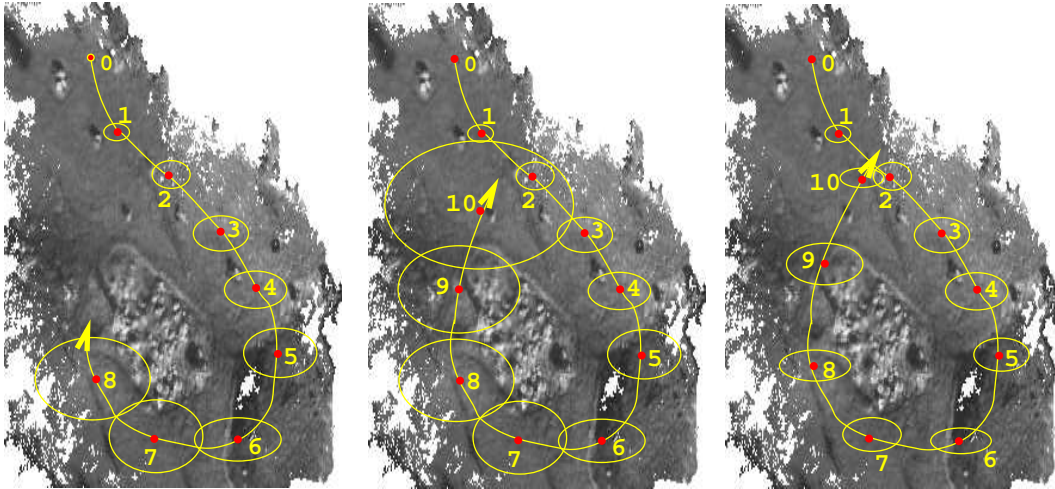


FIG. 1.12 – Principe du recalage par indexation d’images panoramiques : le robot effectue une trajectoire, le long de laquelle il acquiert et mémorise des images panoramiques, et leur associe la position estimée courante (dont l’imprécision est représentée par des ellipses). Au centre, reconnaissance : lorsque le robot croise à nouveau une zone préalablement traversée, l’image courante est mise en correspondance avec les images mémorisées situées dans la zone où le robot se trouve. À droite, à l’issue de la phase de reconnaissance, une meilleure estimée de la position courante est déterminée, et les estimées sur les positions précédentes sont affinées.

de terrain de résolution de l’ordre du mètre (ce qui est proche de la résolution maximum que l’on peut obtenir avec des images aériennes classiques) avec un modèle numérique construit à partir des données acquises par le robot (résolution inférieure à 10 cm), en utilisant une représentation basée sur la décomposition en ondelettes de ces représentations (encadrement des travaux de Vandí Verma, doctorante à CMU, pendant son séjour au laboratoire). Ces travaux ont été peu concluants : d’une part il reste toujours difficile de construire un modèle numérique de terrain à partir des données acquises par le robot, et d’autre part de nombreux éléments de l’environnement ne sont pas du tout perçus de la même manière par le robot terrestre et un engin aérien (ainsi des poteaux, des clôtures, des arbres...).

Intégration d’algorithmes de localisation.

Nous avons vu qu’il était indispensable de disposer de différents algorithmes de localisation complémentaires à bord d’un robot. Leur intégration à bord des robots a soulevé plusieurs difficultés, auxquelles nous avons apporté une réponse dans le contexte du travail de thèse d’Anthony Mallet [36].

Distribution géométrique des capteurs. Les différents capteurs embarqués à bord du robot (odomètres, capteurs inertiels, caméras, GPS) sont géométriquement répartis, et cette répartition peut varier avec le temps (cas d’un châssis articulé ou de caméras montées sur une tourelle orientable par exemple). Les algorithmes de localisation qui exploitent les données de ces capteurs estiment la position de ces capteurs, et il est donc nécessaire d’homogénéiser l’ensemble des positions estimées. Cela est simplement résolu par le maintien d’un graphe qui exprime les relations géométriques entre les capteurs en fonction des différents paramètres de la configuration géométrique interne du robot (figure 1.13). Les informations contenues dans ce graphe sont distribuées à l’ensemble des modules intégrant les capteurs, et chaque donnée acquise est systématiquement datée et positionnée par rapport à un repère de référence arbitrairement choisi dans le robot.

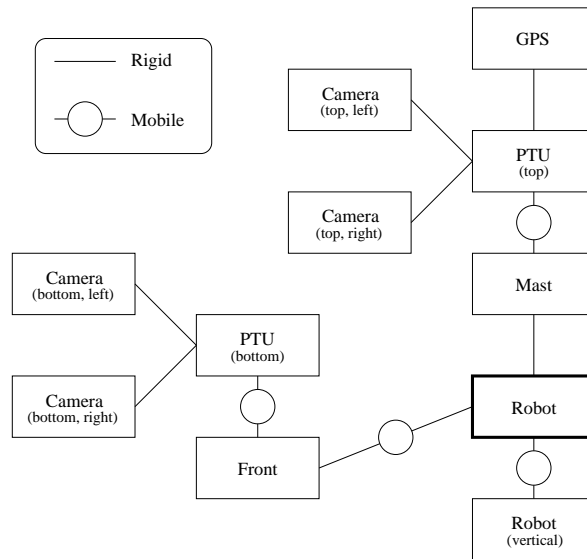


FIG. 1.13 – Le graphe représentant la géométrie du robot Lama. Le rectangles sont des repères liés aux capteurs, qui sont exportés vers les modules d’acquisition de données (le repère de référence choisi est le rectangle “Robot” ici). Les arcs représentent des changements de repères, rigides ou variables - ces derniers étant notés par un cercle.

Asynchronisme des algorithmes. Tous les algorithmes de localisation ne produisent pas leurs données instantanément. Ainsi, ceux qui utilisent les images produites par la stéréovision estiment la position du robot au moment de l’acquisition des images, mais ne produisent cette estimée que quelques secondes plus tard, alors que le robot est toujours en mouvement. Pour prendre en compte ces asynchronismes, nous avons proposé une approche qui mémorise les positions produites par les différents algorithmes sur un certain temps, et qui exploite l’étiquetage des données décrit ci-dessus (date et position relativement à un repère de référence situé sur le robot). Un historique est maintenu pour chaque estimateur de position, et un historique particulier correspondant aux données *fusionnées* est aussi défini. Le système surveille périodiquement chaque estimateur de position : à chaque fois que l’un d’entre eux produit une estimée, elle est insérée dans l’historique correspondant à la date d’acquisition des données utilisées, et l’historique des positions fusionnées est remis à jour à partir de cette date.

Fusion des différentes estimations. Les deux paragraphes précédents décrivent un moyen *structurel* d’intégrer différents algorithmes de localisation. Mais il s’agit d’une organisation des fonctions dédiés à la localisation, et non pas de la fusion des différentes estimées. Pour cela, dans le cadre du post-doctorat de Pierre Lamon, nous avons travaillé sur une extension de travaux proposés par l’Université de Sydney, basée sur le filtre d’information, qui permet la fusion décentralisée de différents algorithmes de localisation. Ces travaux devraient déboucher sur des applications multi-robots.

1.1.3 Construction de modèles de l’environnement

Classification de terrain

Nous avons développé un algorithme qui permet de déterminer de manière qualitative la *nature géométrique* du terrain à partir de données 3D : la zone perçue est discrétisée en cellules, pour lesquelles des attributs moyens sont déterminés. Après apprentissage supervisé, une procédure de clas-

sification bayésienne (non paramétrique) permet d’affecter à chacune de ces cellules une probabilité partielle d’appartenir à différentes classes de terrain (“plan”, “accidentée” ou “obstacle” par exemple - l’implémentation de la méthode est néanmoins flexible et permet de spécifier les classes de terrain que l’on cherche à identifier).

Cette technique à été appliquée aux données produites par la stéréovision : dans ce cas, la correspondance directe entre chaque point 3D perçu et un pixel de l’image vidéo permet d’associer aux attributs géométriques des cellules des attributs de texture, à partir desquels une estimation de la *nature physique* de la surface est possible. Une procédure de classification bayésienne tout à fait analogue à celle qui raisonne sur les attributs géométriques donne une probabilité partielle pour chaque cellule de correspondre à un type de surface parmi ceux considérés lors d’une phase d’apprentissage. Il nous a fallu pour cela implémenter des algorithmes d’extraction d’attributs de texture sur une image vidéo : la plupart des très nombreuses techniques existantes ont été considérées et évaluées (statistiques sur les variations de niveaux de gris, matrices de co-occurrence, transformées de Fourier, attributs fractals, attributs calculés sur des segments extraits de l’image. . .), et une phase d’analyse discriminante à permis de déterminer parmi ces nombreux attributs de texture ceux qui permettent le mieux de séparer les différentes classes.

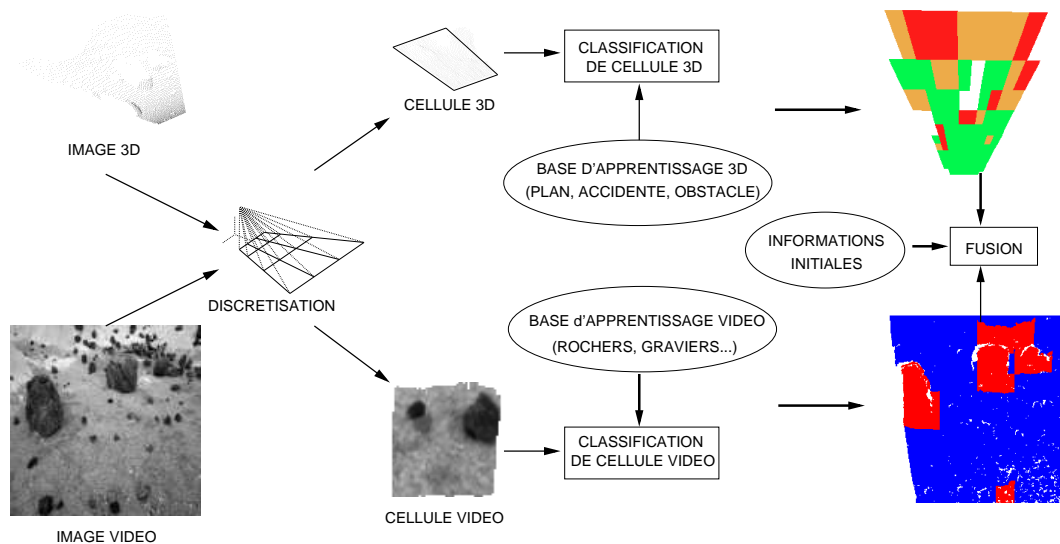


FIG. 1.14 – Principe général de la procédure de classification de terrain

L’ensemble de la procédure de classification a été implémenté à bord des robots Lama et Dala, et son fonctionnement est modulable suivant l’utilisation faite du modèle produit. Ainsi, elle a été utilisée comme fonctionnalité de détection d’obstacles (*ie.* en ne considérant que les deux classes de terrain “plan” et “obstacle”) pour des expérimentations de déplacements réactifs. Elle permet également de construire un modèle qualitatif *global* de l’environnement, en fusionnant les données classées au fur et à mesure de leur acquisition lors des déplacements du robot [48] (figure 1.15) : ce modèle peut notamment être utilisé pour déterminer des *stratégies de déplacement* (section 1.2.3).

Construction de modèles numériques de terrains

Lorsque le terrain est accidenté, le modèle qualitatif précédent ne suffit plus à la détermination des déplacements. Nous avons donc développé une méthode de construction de modèle numérique

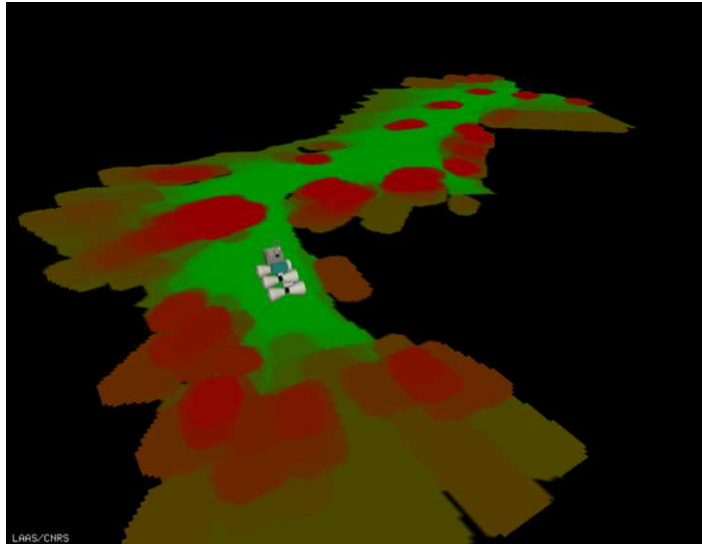


FIG. 1.15 – Modèle qualitatif de l’environnement construit par la fusion de 150 paires stéréoscopiques, acquises par Lama le long d’une trajectoire de quelques dizaines de mètres.

de terrain, ou *carte d’élévation*, qui décrit la surface perçue comme une fonction $z = f(x, y)$, x et y prenant des valeurs discrètes selon une grille cartésienne horizontale et régulière. La difficulté de ce problème réside essentiellement dans la prise en compte des imprécisions des données d’entrée, et dans leur codage dans le modèle.

La manière la plus rigoureuse de construire une carte d’élévation serait d’utiliser une technique analogue aux grilles d’incertitudes. Ces techniques ont été initialement développées dans le contexte d’environnements structurés pour construire une carte bidimensionnelle à partir de mesures de distances. Elles modélisent l’environnement par un ensemble de cellules régulières, dont la probabilité qu’elles contiennent un obstacle ou qu’elles soient libres est mise à jour à partir des données perçues à l’aide d’un formalisme bayésien. Dans le cas de la perception d’une surface, il faudrait remplir une grille d’occupation tridimensionnelle, qui pour chaque cellule (x, y) exprimerait la probabilité d’occupation à diverses altitudes discrétisées. La taille de la mémoire nécessaire à cette représentation, et la mise à jour assez délicate des probabilités de chacune des cellules font qu’une telle technique n’a jamais été développée dans le contexte d’environnements naturels.

Nous avons cependant analysé le problème de manière formelle en simulation (figure 1.16), afin d’en déduire une manière pratique de mettre à jour les cellules dans un cas réel (figure 1.17) : outre l’information d’altitude, une information de *précision* et une information de *confiance* est maintenue pour chaque cellule. La confiance est déduite de la surface couverte par le pixel correspondant au point 3D à fusionner, et la mise à jour de l’imprécision de l’élévation prend en compte cette confiance et la précision estimée sur l’altitude du point, fournie par le modèle d’erreur sur la stéréovision.

Les algorithmes de construction de modèle numérique du terrain ont tout naturellement été étendus au cas d’images stéréoscopiques aériennes (figure 1.18).

Mais un tel modèle est difficilement exploitable par un autre robot, qu’il soit terrestre ou aérien : il est notamment difficile d’y identifier des amers qu’un robot terrestre puisse ultérieurement exploiter pour y naviguer. C’est l’objet des travaux réalisés sans le cadre de la thèse de Sébastien Bosch, qui portent sur la modélisation de l’environnement à partir de primitives géométriques (droites et plans) extraites dans des séquences d’images monoculaires, ainsi que sur la détection d’éléments mobiles dans l’environnement, dans le but de les éliminer du modèle construit.

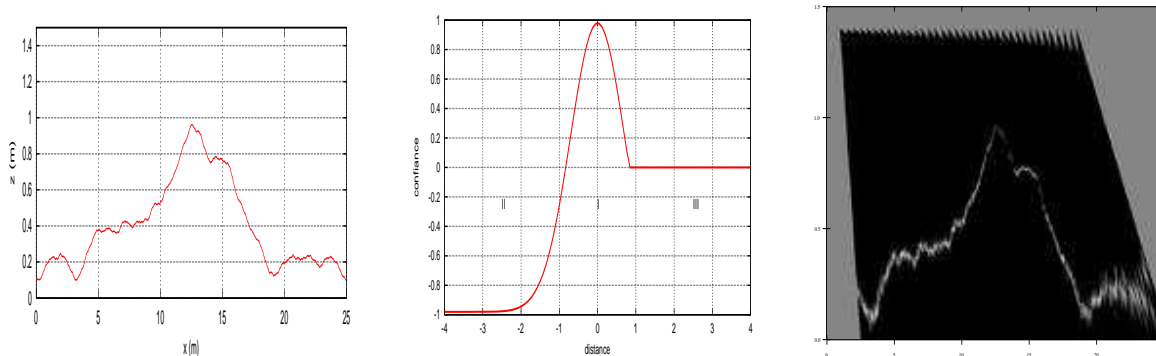


FIG. 1.16 – Illustration en 2 dimensions d’une méthode de mise à jour d’une grille d’occupation à partir de données de profondeur, en utilisant les formules de mise à jour des probabilités de Dempster-Shafer. Un profil de terrain simulé (à gauche) est perçu par une caméra stéréoscopique ”plane”, dont le modèle d’erreur est illustré au centre. La figure de droite montre la grille d’occupation construite en intégrant les données d’une quarantaine de positions de la caméra (qui s’est déplacée horizontalement au dessus du profil). Grâce à la fusion d’un très grand nombre de points, les erreurs résultantes sont inférieures à 2.0 cm, alors que dans cette simulation l’écart type sur l’estimation de la distance est de $0.1x^2$, x étant la distance des points perçus.

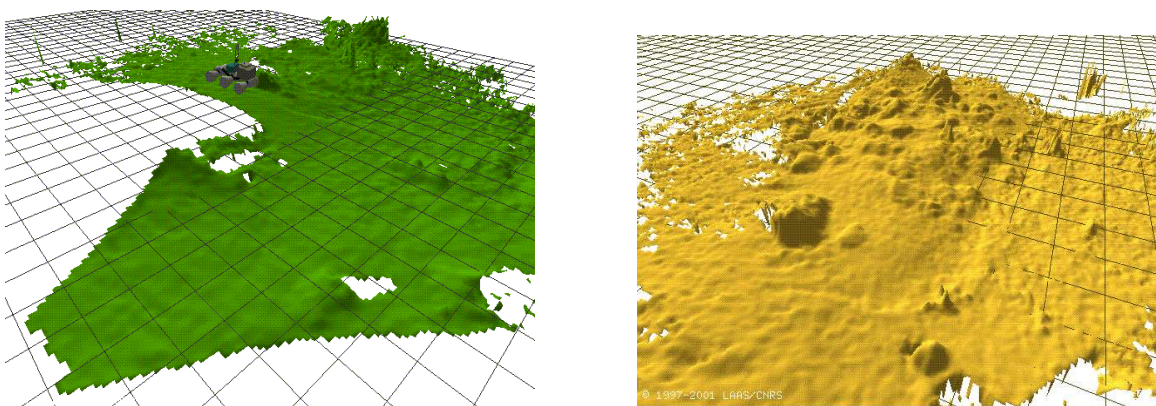


FIG. 1.17 – Deux cartes d’élévation construites par le robot Lama. A gauche, après un déplacement d’environ une quarantaine de mètres le long duquel une centaine de paires stéréoscopiques ont été acquises. A droite, modèle d’une zone accidentée après en avoir fait le tour (120 images intégrées). La taille de la grille affichée est de $1 \times 1m$, et la résolution du modèle est de $0.1 \times 0.1m$.

Modélisation et reconnaissance d’objets non-structurés

Il est difficile de représenter la géométrie des objets non-structurés rencontrés en milieu naturel (rochers, végétation...) de manière analytique, en combinant des primitives géométriques complexes telles que des super-quadrriques par exemple. Néanmoins, la capacité de modéliser de tels objets peut aider au problème SLAM, la reconnaissance d’objets permettant de lever des ambiguïtés sur les appariements possibles d’amers.

En s’inspirant de travaux initialement développés dans la contexte de l’imagerie médicale, nous avons réalisé un système de modélisation d’objets non-structurés par des surfaces déformables à partir de données 3D (figure 1.19) : après une phase de segmentation de l’image de points 3D d’une scène qui exhibe les objets présents, un maillage initial est superposé autour de chaque nuage de points correspondant à un objet. Grâce à l’application de forces liant les points d’un maillage entre eux et les points de données, le maillage converge itérativement vers une position d’équilibre qui

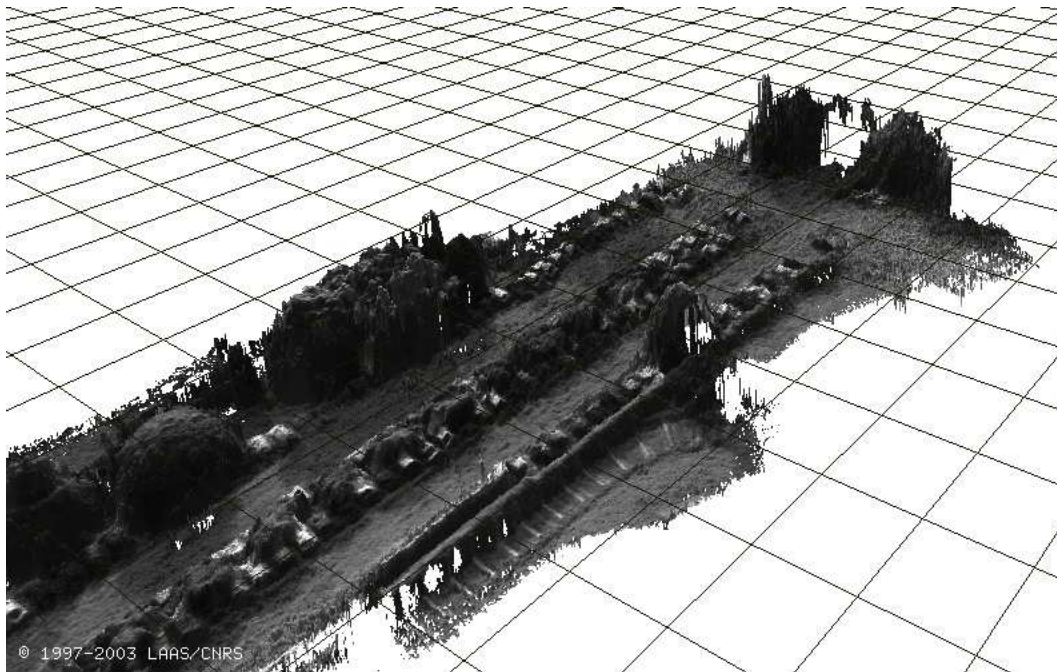


FIG. 1.18 – Modèle numérique de terrain reconstruit à partir des 400 paires d'images aériennes acquises par la ballon dirigeable Karma, durant la trajectoire estimée en figure 1.8. Il couvre une surface d'environ 6000 m².

représente assez fidèlement la forme de l'objet. Des attributs géométriques de l'objet (normales à la surface et courbures) peuvent alors être déterminés de manière assez robuste, et sont utilisés pour le représenter sur une sphère, obtenue par gonflement du maillage. Des algorithmes de corrélation permettent alors d'associer différents maillages correspondant aux mêmes objets (tâche de reconnaissance) ; et de déterminer le déplacement effectué entre deux perceptions à partir des maillages représentant le même objet (tâche de localisation).

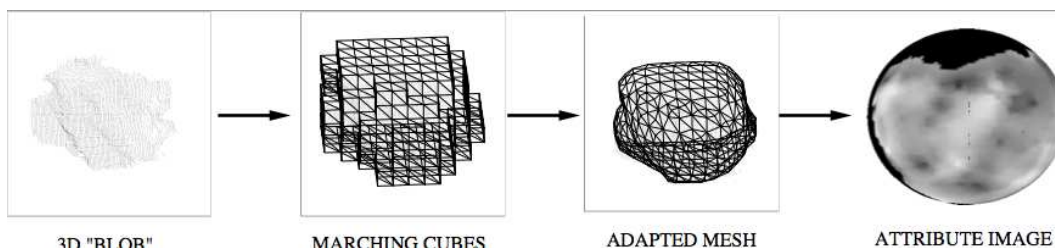


FIG. 1.19 – Modélisation géométrique d'objets non structurés à l'aide d'un maillage déformable. De gauche à droite : nuage de points correspondant à un objet (isolé grâce à une procédure de segmentation), maillage initial, maillage après convergence, sphère représentant les attributs déterminés sur le maillage (ici la courbure représentée par des niveaux de gris).

Ces travaux anciens (ils remontent à 1997) n'ont pas été poursuivis, essentiellement car la robustesse de l'algorithme de mise en correspondance de points d'intérêt a permis d'aborder le problème SLAM. Cependant, nous avons récemment recommencé à travailler sur des représentations permettant d'identifier sans ambiguïté des objets non structurés, pendant le stage de DEA de Cyrille Berger (2005). Le modèle proposé est constitué d'un ensemble de facettes correspondant à des zones localement planes de l'environnement, pour lesquelles la texture perçue est mémorisée (figure 1.20). Nous

travaillons actuellement sur un algorithme de mise en correspondance de telles facettes.

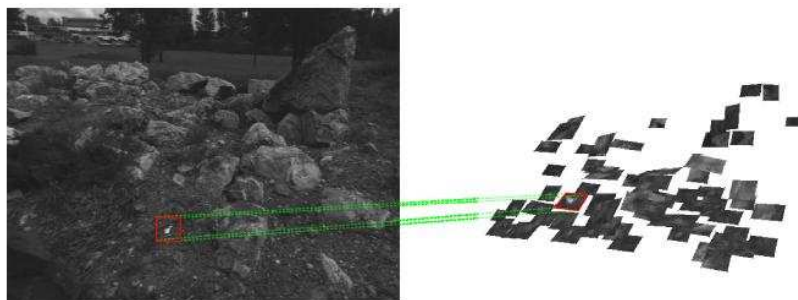


FIG. 1.20 – Description d'une scène par ses facettes localement planes.

1.2 Navigation autonome

Nous avons toujours favorisé une approche *adaptive* de la navigation autonome en environnements naturels, dans laquelle le robot sélectionne le mode de déplacement le plus approprié à l’environnement qui l’entoure. Cela nécessite de développer plusieurs modes de déplacements, qui sont chacun une instance particulière de la boucle “perception-décision-action”, et aussi de définir les moyens de choisir le mode le mieux adapté.

1.2.1 Génération de déplacements locaux

En terrains essentiellement plan

Par une méthode de potentiels. Dans un contexte où le terrain est essentiellement plan et encombré d’obstacles éparés, un mode de déplacement “réflexe” (ie. dans lequel les consignes de mouvement sont générées à partir d’une perception locale de l’environnement) s’avère suffisant et efficace [49]. Dans le contexte de la thèse d’Hassan Haddad, nous avons développé une fonctionnalité de génération de mouvement dite “des potentiels artificiels”, qui détermine les déplacements élémentaires à partir d’une carte locale d’obstacles et de la position du but à atteindre. Pour détecter les obstacles, nous avons adopté la technique de classification du terrain, et adapté les techniques de génération de déplacements à la description probabiliste de l’environnement ainsi produite.

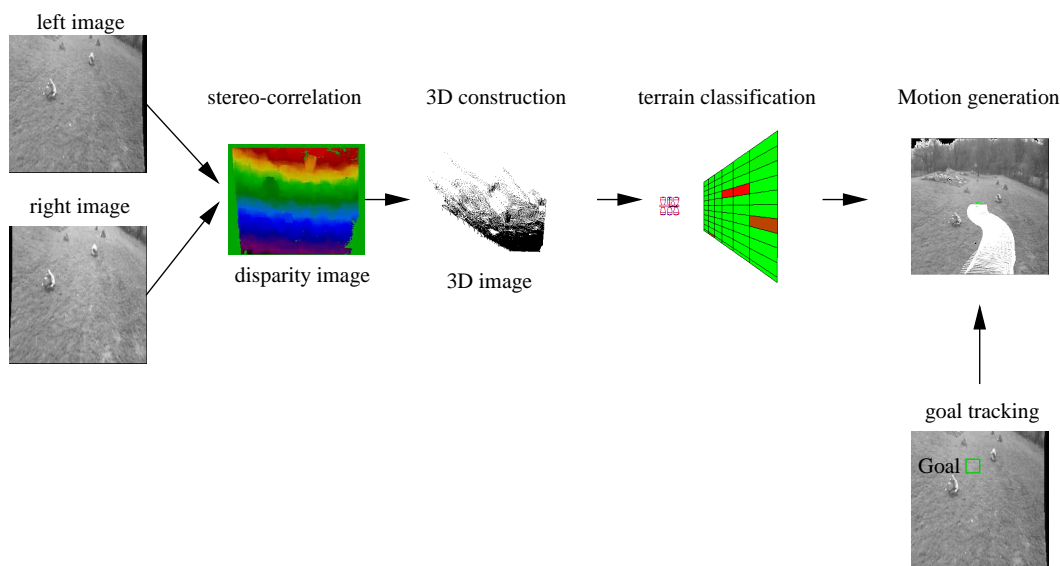


FIG. 1.21 – Principe de la génération de mouvements par la méthode des potentiels.

Par évaluation d’arcs élémentaires. Ultérieurement, toujours sur la base du modèle qualitatif qui représente le terrain en régions auxquelles sont associées des probabilités qu’elles soient planes, accidentées ou obstacles, nous avons proposé une méthode simple qui repose sur l’évaluation d’un ensemble de trajectoires élémentaires (arcs de cercle). Le choix de celle qui est la mieux adaptée est effectué en fonction de critères de coût déterminés à partir des probabilités codées dans le modèle. Cette méthode s’est avérée efficace pour faire évoluer le robot dans un terrain majoritairement plan, sur lequel existent seulement quelques obstacles éparés (figure 1.22).

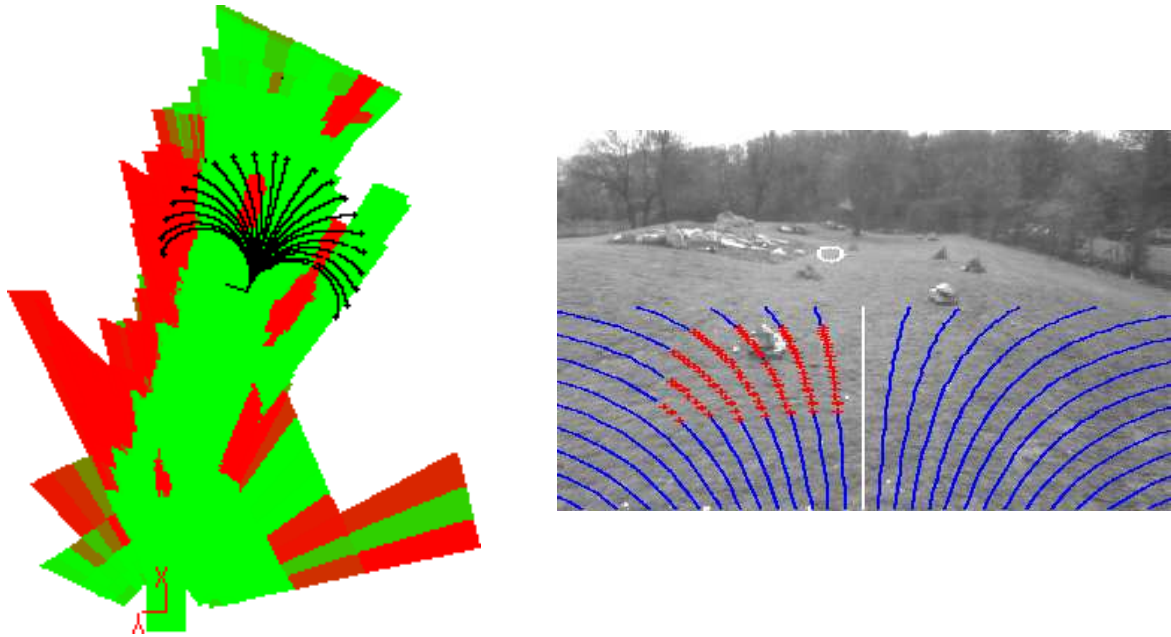


FIG. 1.22 – Un ensemble d’arcs de cercles évalués sur le modèle qualitatif du terrain construit (à gauche), et sa projection dans la vue courante qu’à le robot du terrain, dans laquelle l’arc choisi est en blanc (à droite)

En terrains accidentés

Lorsque le terrain est plus accidenté, la notion d’obstacle est mal définie. Il faut alors générer les déplacements du robot en évaluant la satisfaction de contraintes telles que la stabilité du robot, sa non collision avec le sol et la faisabilité de sa configuration interne lorsque son châssis est articulé (figure 1.23). Dans le cadre du stage de DEA de David Bonnafous [33], nous avons transféré et adapté des fonctions de placement du robot sur un modèle numérique de terrain précédemment développées au sein de l’équipe par mon collègue Nicolas Siméon, pour générer des mouvements élémentaires sur la base du modèle numérique de terrain (figure 1.24).

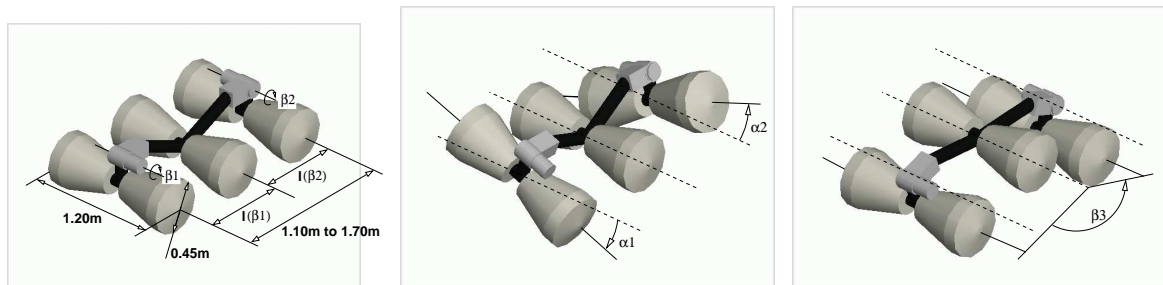


FIG. 1.23 – Les articulations passives du châssis de Lama.

Le principe de la génération des mouvements est analogue à la méthode qui a été développée sur terrains plans : un ensemble d’arcs de cercles est évalué, mais cette fois leur coût est déterminé grâce à la fonction de placement. Ainsi les arcs le longs desquels le châssis reste dans une configuration stable et éloignée de valeurs limites correspondant à des butées mécaniques sur les articulations sont favorisés, au détriment de ceux pour lesquels les configurations varient plus. L’ensemble des arcs sont évalués en fonction de ces coûts et de leur intérêt, exprimé par la distance de Dubbins qui permet de

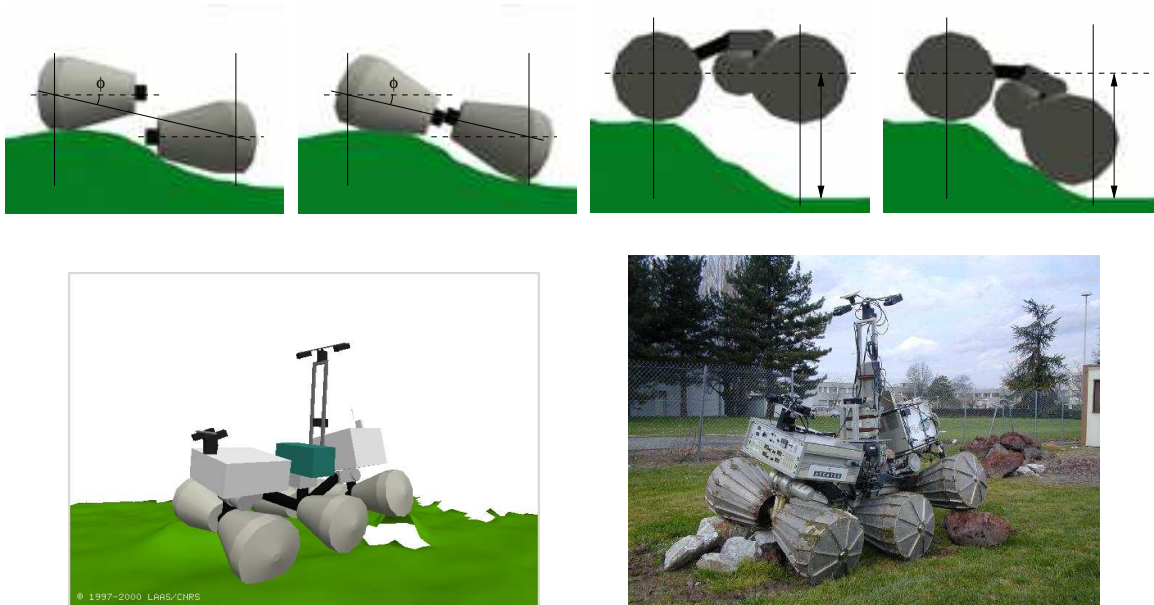


FIG. 1.24 – En haut : principe du calcul itératif du placement d’un essieu (deux figures de gauche), et de l’ensemble des essieux (deux figures de droite). En bas à gauche, un placement prédit du robot sur la base du modèle numérique de terrain pour une position donnée, et à droite, la configuration réelle du robot sur le terrain à cette même position.

rallier le but.

1.2.2 Contrôle des déplacements

Contrôle de locomotion du robot Lama. Le robot Lama est commandé en vitesses linéaires et angulaires, les vitesses de chacune des trois roues d’un côté étant identiques, la différence entre les vitesses des deux côtés définissant la vitesse angulaire. Avec une telle structure de locomotion, l’estimation de la vitesse angulaire est fortement biaisée par les glissements qui apparaissent inévitablement, et les trajectoires exécutées sont sensiblement différentes des trajectoires commandées. Ceci peut être arrangé par l’utilisation d’un gyroscope à fibre optique, mais le problème du contrôle de la locomotion est encore plus délicat lorsque le robot doit traverser une zone accidentée ou franchir un obstacle. Une nouvelle loi de commande a donc été définie, de manière à limiter les glissements qui apparaissent dès que les 6 roues du robot ne sont plus dans un même plan [26]. Elle consiste à adapter dynamiquement la vitesse de chacune des roues, en fonction des dérivées des angles de configuration du châssis et d’attitude du robot. Cette loi a été intégrée à bord du robot Lama : elle améliore notablement ses capacités de franchissement de zones accidentées, et permet aussi de sélectionner les roues qui glissent le moins pour le calcul de l’odométrie, améliorant ainsi l’estimation de position produite.

Commande de vol. En ce qui concerne la commande de vol, bien qu’il s’agisse d’un domaine qui m’est encore assez étranger, j’ai suivi les travaux de Leonardo Solaque (doctorant de l’Université de Bogota en Colombie, qui a effectué deux séjours de 10 mois au Laas) portant sur l’intégration de lois de commande à bord du dirigeable Karma [19]. Des lois simples (de type PID) ont été implémentées, mais ces travaux sont toujours en cours. Par contre, je m’investis plus significativement dans la problématique de génération de déplacements pour un drone dans le but de suivre des éléments au sols (mobiles ou chemins détectés par vision) : il s’agit plus de décider de stratégies de

suivi que de développer des lois de commande. Ces travaux viennent de commencer, avec le doctorat de Panos Theodorakopoulos.

1.2.3 Stratégies de navigation

Sélection des sous-buts et des modes de déplacement. Les méthodes de génération de déplacement décrites ci-dessus sont *locales*, dans le sens où elles ne génèrent que des déplacements élémentaires. Elles ne peuvent déterminer le moyen de sortir d'une impasse par exemple, et il n'y a aucune garantie que l'ensemble des déplacements qu'elles ont généré pour atteindre un but ne constitue un chemin efficace. Elles sont par contre suffisantes pour effectuer des tâches de navigation par points de passage, les points de passage étant spécifiés par un opérateur qui guide ainsi le robot, ou bien par un planificateur de chemins.

Pour effectuer des tâches de navigation autonome à long terme, il est nécessaire de *planifier* les déplacements sur la base de l'ensemble des informations dont dispose le robot sur son environnement. Nous avons conçu un tel planificateur, qui exploite un graphe construit à partir du modèle qualitatif de l'environnement pour déterminer le meilleur sous-but à rallier, le mode de déplacement local à utiliser pour le rallier, et la tâche de perception à y effectuer [27] (figure 1.25). Le planificateur est développé en exploitant les résultats de la théorie de la décision : il exploite un modèle statistique de la fonction de modélisation de l'environnement, ainsi que la présence de zones de localisabilité et un modèle de la dérive en position du robot pour déterminer les chemins les plus sûrs pour rallier le but. Ce planificateur a été intégré à bord des robots Lama et Dala.

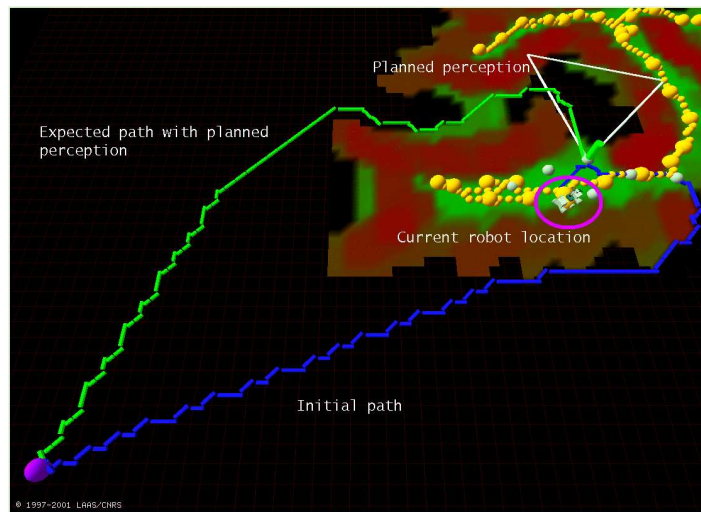


FIG. 1.25 – Résultat du planificateur de sous-buts : sans prendre en compte les capacités de perception du robot, le chemin trouvé (en bleu) est plus long qu'en considérant les capacités de perception (en vert)..

Supervision de la navigation. Parmi les différents problèmes posés par la navigation d'un robot en environnement naturel non structuré, ceux posés par la surveillance de l'exécution du mode de déplacement sélectionné ont encore été très peu abordés. Les difficultés sont multiples : la variabilité des situations rencontrées est très grande, la perception que le robot a de son environnement est souvent incertaine et imprécise, et enfin le robot manque bien souvent d'informations pertinentes sur son comportement courant. Comme nous disposons dorénavant d'un ensemble de modes

de déplacement (sélectionnés par le planificateur adéquat sur la base d'un modèle qualitatif de l'environnement présenté en section 1.2.3), nous définissons dans le cadre de la thèse de Thierry Peynot un système qui surveille leur exécution, grâce à une observation des différents processus impliqués [15]. Pour cela, il est nécessaire de mettre au point des méthodes d'évaluation du comportement du robot lors de phases de déplacement et de se servir de ces évaluations pour choisir en ligne le meilleur mode de déplacement (lorsque le robot dispose de plusieurs possibilités). Nous avons choisi de traiter ce problème en utilisant un formalisme probabiliste en raison du caractère incertain des données perçues par le robot.

1.3 Coopération multi-robots

Depuis 3 ans, je me suis investi dans les aspects décisionnels liés à la coopération multi-robots, ce qui constitue une thématique nouvelle pour moi. J’ai abordé cette problématique en collaboration étroite avec mon collègue Rachid Alami, avec lequel j’ai co-encadré la thèse de Jérémie Gancet, et les deux thèses qui débutent de Sylvain Joyeux et Gautier Hattenberger.

Les travaux menés ont pour l’instant essentiellement porté sur la coopération entre robots aériens, pour l’opération desquels des fonctions de modélisation de l’environnement ne sont pas nécessaires. Dans un futur très proche, ces travaux vont être menés dans le contexte de la coopération entre robots terrestres et aériens : cette fois, les capacités de modélisation de l’environnement seront au cœur des problèmes décisionnels.

Une architecture pour la coopération entre UAVs

Les travaux de thèse de Jérémie Gancet ont porté sur la coopération entre plusieurs robots aériens (UAVs) dans le contexte du projet européen Comets. Nous nous sommes principalement intéressés à l’organisation des différentes composantes décisionnelles au sein de chacun des UAVs, afin qu’il puissent être intégrés dans un système multi-UAVs et exhiber des comportements de coopération et de coordination [17, 20]. Dans ce but, nous avons introduit une notion de ”degré d’autonomie décisionnelle”, qui reflète le niveau de délégation de capacités autonomes aux robots par un opérateur du système ou par un centre de contrôle. Cinq degrés ont été définis, selon la localisation des fonctionnalités décisionnelles de supervision, coordination, planification et allocation des tâches (figure 1.26).

		Supervision and execution	Coordination	Task planning	Task allocation
High Levels	Level 5	D	D	D	D
	Level 4	D	D	D	C
Low Levels	Level 3	D	D	C	C
	Level 2	D	C	C	C
	Level 1	C	C	C	C

FIG. 1.26 – Une taxonomie des niveaux d’autonomie dans un système multi-robot. “D” signifie que la fonction est distribuée au sein des robots, “C” signifie qu’elle est centralisée.

Un exécutif générique est proposé pour interfacer, au niveau de chacun des UAV du système, les différentes configurations possibles de délégation de l’autonomie décisionnelle : celui-ci reçoit et traite des plans de tâches générés soit par un centre de contrôle en charge de tous les UAVs (bas degrés d’autonomie), soit par une couche délibérative au niveau de chacun des UAV (haut degrés d’autonomie) .

Pour les hauts degrés d’autonomie, nous avons proposé une couche délibérative permettant aux UAVs de planifier et coordonner leurs tâches, afin d’opérer conjointement dans le cadre d’une mission donnée. Cette couche délibérative regroupe un couple planificateur symbolique / raffineurs géométriques :

les raffineurs géométriques permettent de remonter des informations d'utilité et de coût au planificateur symbolique, en manipulant les modèles de l'environnement et des UAVs (figure 1.27). Un gestionnaire d'interactions entre plusieurs UAVs à base de modèles a aussi été proposé. Une partie des développements a été testée avec succès dans le cadre du projet COMETS, avec 3 UAV hétérogènes (hélicoptères et dirigeable), les autres développements ayant donné lieu à des tests en simulation.

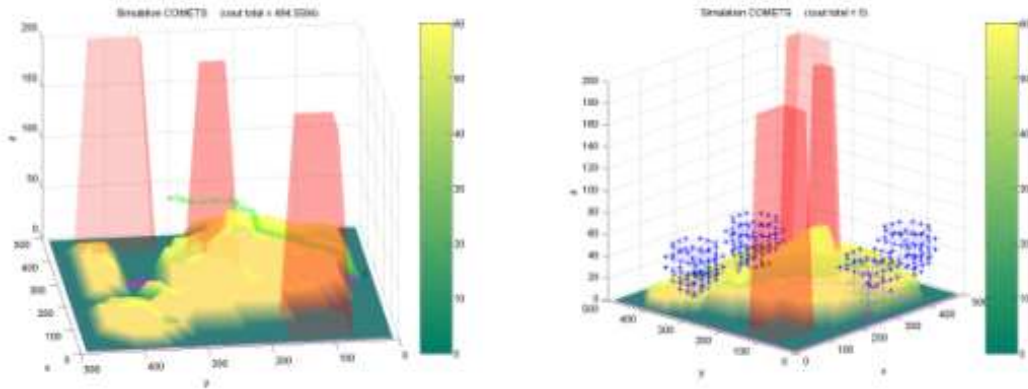


FIG. 1.27 – Illustrations de deux “raffineurs” : à gauche, détermination de chemin dans l’espace (les volumes rouges représentent des zones à éviter). À droite, les points bleus représentent l’ensemble des positions desquelles un élément donné au sol peut être perçu.

Allocation de tâches dans un système multi-UAVs

Toujours dans le contexte du projet européen Comets, nous avons proposé une méthode distribuée d’allouer des tâches au sein d’un ensemble d’UAVs. La méthode est basée sur le principe des enchères (“market-based approach”, ou bien “contract-net protocol”), et permet de résoudre de manière distribuée en temps quasi immédiat le problème du voyageur de commerce “multi” ([22], figure 1.28). Elle a été étendue pour pouvoir prendre en compte des contraintes de positionnements relatifs entre les engins, afin de prendre en compte les contraintes de communication.

Vol en formation d’UAVs

Dans le contexte de la thèse de Gautier Hattenberger, nous avons très récemment commencé à étudier le vol en formation d’UAVs. Il s’agit en fait d’aborder le problème du convoyage d’un ensemble d’UAVs (quelques unités) en satisfaisant un ensemble de contraintes : détection de menaces, empreinte minimale de l’ensemble, distances minimales inter-UAV à respecter, et points de passage à rallier. Pour l’instant, un algorithme permettant de gérer le changement de configuration lors du convoyage a été proposé (figure 1.29), mais le problème est actuellement considéré dans sa globalité - en considérant notamment la planification de mission et la re-planification en ligne.

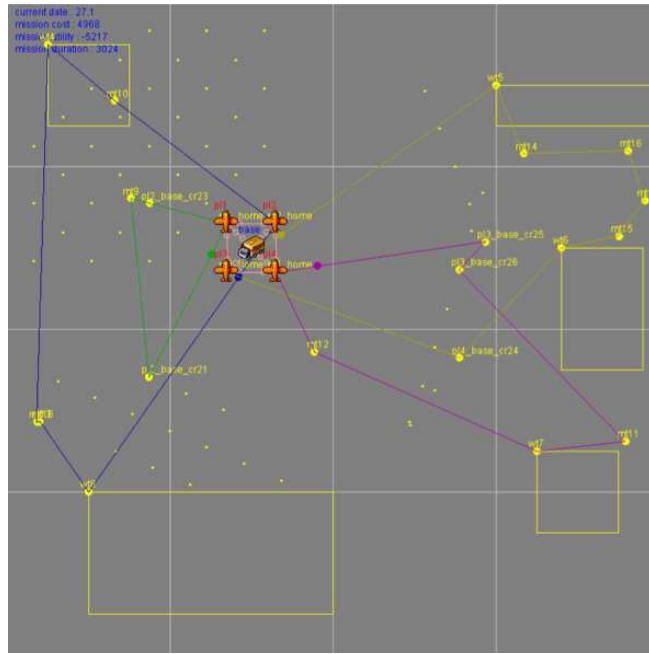


FIG. 1.28 – Résultat de l'allocation de tâches pour 4 UAVs à l'issue de la phase de négociation : à chaque UAV est associé un ensemble ordonné de points à rallier.

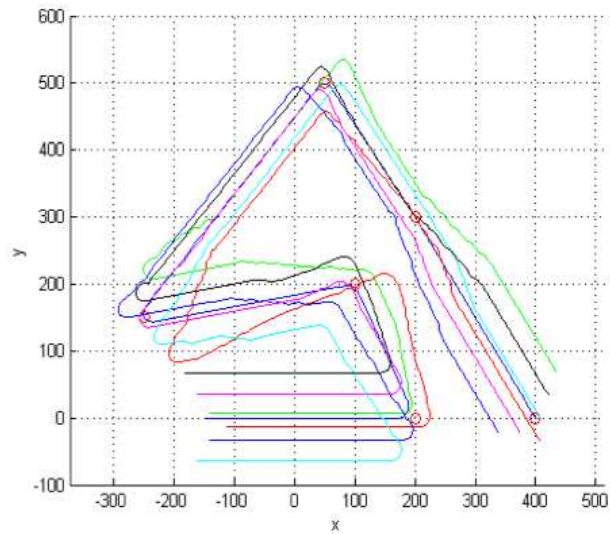


FIG. 1.29 – Changement de configuration au sein d'une formation de 7 UAVs le long d'une trajectoire définie par points de passage (cercles rouges).

1.4 Développements expérimentaux

J'attache une grande importance à la validation expérimentale des développements, car elle seule permet d'analyser leur validité dans des contextes réalistes. Pour cette raison et dans le cadre de l'animation de l'ensemble des activités liées à la robotique en environnements naturels au laboratoire, une bonne partie de mes activités concerne le développement de plate-formes expérimentales et de leur exploitation, en collaboration étroite avec le soutien technique (ingénieurs et techniciens) du laboratoire, et particulièrement avec mes collègues ingénieurs Sara Fleury, Matthieu Herrb et Jérôme Manhes.

A mon arrivée au laboratoire en 1996, le robot Lama venait d'être livré : j'ai participé à la définition et la réalisation de son équipement. Depuis, j'ai supervisé le développement et la mise à jour du robot Dala, du ballon dirigeable Karma, et tout récemment du drone Lhassa.

1.4.1 Le robot Lama.



FIG. 1.30 – *Le robot Lama*

Le robot Lama est un châssis à 6 roues de conception russe, acquis par Alcatel en 1995, prêté au LAAS depuis 1996. Son équipement a été complètement spécifié et réalisé au laboratoire (figure 1.30) :

- Chaque roue est munie de codeurs optiques, et les moteurs sont contrôlés par des variateurs de puissance, permettant ainsi un contrôle fin des déplacements.
- Un inclinomètre deux axes fournit les informations d'attitude, et un gyromètre à fibres optiques fournit la vitesse de rotation instantanée du châssis.
- Un premier banc stéréoscopique monté sur une plate-forme orientables suivant deux axes est monté sur un mat de 1.80 m, solidaire de l'essieu central. Son champ de vue horizontal est d'environ 60° , et est essentiellement dédié au suivi de cibles.
- Un second banc stéréoscopique, lui aussi orientable, est monté sur l'essieu avant. Son champ de vue horizontal est d'environ 90° , il est exploité pour modéliser le terrain à l'avant du robot.
- Enfin, un récepteur GPS à différence de phase, prêté par nos collègues du CNES, a été utilisé pour qualifier les algorithmes de localisation.

Les processeurs sont montés dans un rack VME et opérés par le système d'exploitation temps-réel VxWorks (deux 68040 ont en charge l'acquisition des données et le contrôle des actionneurs, les algorithmes de modélisation, localisation et génération de déplacements sont intégrés sur deux PowerPc).

De nombreuses démonstrations de navigation autonome intégrant divers développements ont été réalisées à l'aide de Lama (navigation par champs de potentiel, intégration d'algorithmes de localisation, navigation intégrant deux modes de déplacement locaux et le planificateur de navigation...). En particulier, des démonstrations ont été réalisées chez Alcatel Espace fin 1997, et des démonstrations publiques de navigation autonome ont été réalisées durant deux journées à la Cité de l'Espace en Septembre 2000 (figure 1.31).

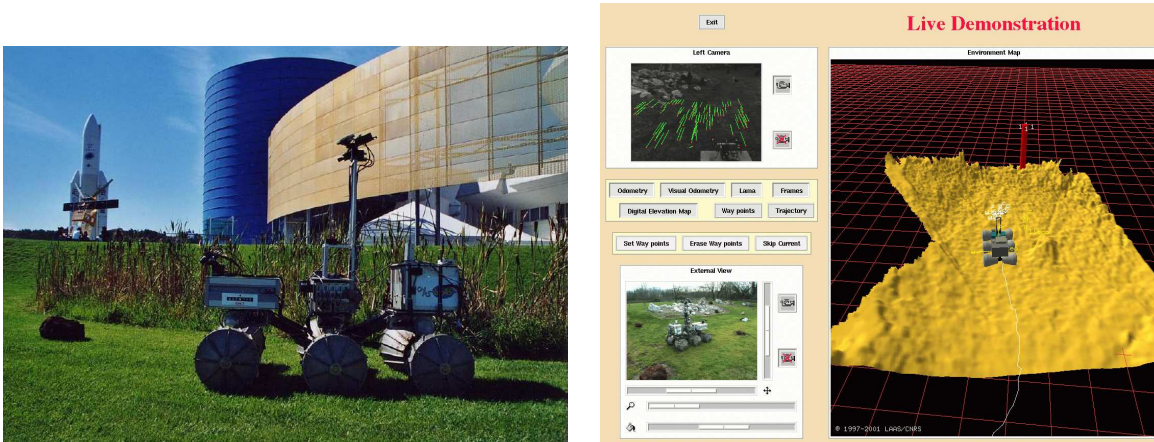


FIG. 1.31 – Le robot Lama à la cité de l'Espace en Septembre 2000. À droite, vue de l'interface opérateur.

Le robot Lama n'a pas évolué depuis l'année 2000, mais il a néanmoins été exploité jusqu'à la fin 2003, date depuis laquelle il n'est plus opérationnel (après une avoir été exposé quelques semaines au siège du CNRS en 2004, Lama il est depuis l'automne 2005 en exposition permanente au musée des Arts et Métiers à Paris).

1.4.2 Le robot Dala.

Le robot Dala a été acquis en Janvier 2002 auprès de la société iRobot. Il s'agit d'un engin à quatre roues motrices non-directionnelles (figure 1.32), que nous avons équipé d'un banc stéréoscopique couleur (caméras numériques), d'un télémètre laser d'une caméra panoramique, d'une centrale inertielle 6 axes et d'un gyromètre à fibre optique.

La plupart des algorithmes qui ont été implémentés à bord de Lama ont été portés sur Dala, et d'autres modes de navigation basés sur l'utilisation du télémètre laser on été développés. Ces derniers temps, Dala a surtout fait l'objet d'expérimentations supervisées par mon collègue Félix Ingrand. Ces démonstrations impliquent une couche décisionnelle qui intègre un planificateur de tâches avec prise en compte des contraintes temporelles, un système de replanification en ligne et une couche d'interface entre les fonctionnalités de navigation et le superviseur.

1.4.3 Le ballon dirigeable Karma.

Afin de pouvoir étudier les problèmes posés par la coopération entre robots terrestres et aériens, nous avons décidé d'acquérir un ballon dirigeable, et de l'équiper des instruments nécessaires au



FIG. 1.32 – *Le robot Dala*

développement de capacités de mission autonome [28]. Outre l'opération coordonnée du ballon avec un robot terrestre, qui est un objectif à moyen terme, deux grands thèmes de recherche ont été définis autour de ce ballon :

- Contrôle automatique de vol : il s'agit dans un premier temps de doter l'engin de la capacité de suivre une trajectoire, sur la base des informations retournées par les capteurs d'état du système (6 paramètres de position et 6 paramètres de vitesse) [74]. À terme, il s'agit de rendre l'engin capable de faire des déplacements référencés par ce qu'il perçoit au sol : suivi de mobile ou d'éléments linéaires (routes et chemins, lisières de bois, lignes à haute tension...). Ces travaux ont été réalisés par un doctorant sous la direction de Philippe Soueres. Sous ma direction, Leonardo Solaque, doctorant de l'université de Bogota qui a passé deux années au laboratoire, a poursuivi ces travaux dans le but de les valider par des expérimentations.
- Modélisation de l'environnement survolé : la capacité de fusionner les informations acquises par différents robots est une fonctionnalité préalable au développement de tout schéma de coopération entre les robots (les résultats dans ce domaine ont été présentés en sections 1.1.2 et 1.1.3).

Nous avons donc acquis un ballon dirigeable de $8.00m$ de long et $1.80m$ de diamètre, pour lequel nous avons spécifié, acquis et intégré un ensemble d'instruments permettant d'étudier ces thèmes de recherche, en considérant bien entendu les fortes contraintes de poids. Les premiers vols instrumentés de ce ballon ont eu lieu en Juillet 2002 ; pour cela, nous avons loué un local d'une cinquantaine de mètres carrés près d'un aérodrome, à Graulhet dans le Tarn.

Après quelques vols, il nous est apparu que le modèle que nous avons acquis ne satisfaisait pas nos contraintes en terme d'autonomie énergétique et de charge utile. Nous avons donc *entièrement spécifié et réalisé* un nouveau ballon, dont l'enveloppe a été réalisée par la société Zodiac (figure 1.33). J'ai mené ces travaux avec un ingénieur embauché en CDD pendant un an, et le vol inaugural de ce nouveau ballon a eu lieu en Mars 2003. Cette plate-forme nous a notamment permis de participer au projet européen Comets de Mai 2002 à Juin 2005, durant lequel nous avons mené trois séries d'expérimentations au Portugal, et de faire nos premiers pas en robotique aérienne. Son équipement embarqué est actuellement en phase de mise à jour, et elle sera encore utilisée dans les années à venir.

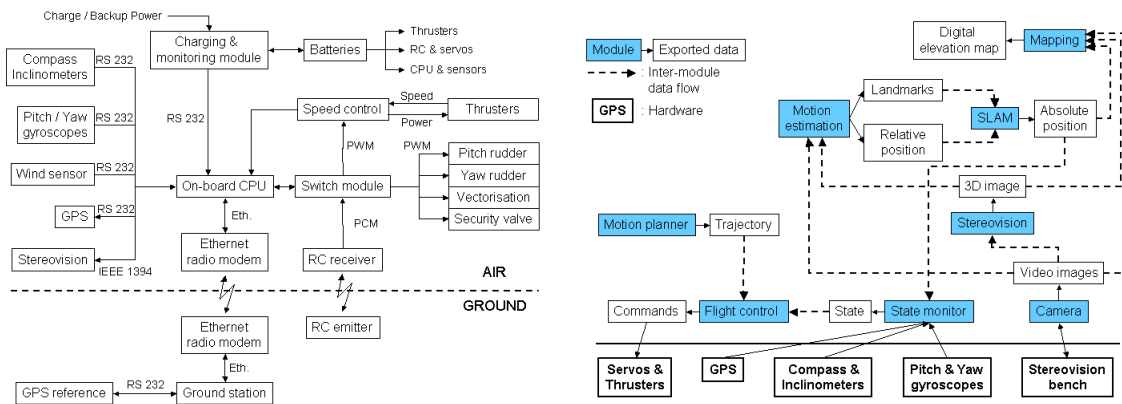


FIG. 1.33 – Dernière version du ballon dirigeable Karma. En bas : architectures matérielle et logicielle embarquées.

1.4.4 Le drone Lhasa.

Nous avons été contactés par la société Dassault Aviation afin d'étudier les problèmes posés par le vol en formation de drones (travaux de thèse de Gautier Hattenberger). Le partenaire avait aussi la volonté de voir les développements validés par des expérimentations, et a souhaité que nous prenions en charge ces aspects. Dans le cadre d'une opération contractuelle, nous avons donc spécifié un drone et sa charge utile. Le drone a été réalisé par une société externe (LLMicroelectronics) et livré au laboratoire en Mai 2005 : il est muni d'une électronique embarquée qui offre différents niveaux d'automatismes : stabilisation en assiette, stabilisation en cap, vitesse et altitude, et suivi de points de passage. La charge utile a été réalisée au laboratoire, et comporte un PC embarqué communiquant avec l'électronique de pilotage et le sol, ainsi qu'une caméra orientable suivant deux axes (figure 1.34). Cet engin va notamment nous permettre de travailler sur les problèmes de modélisation de l'environnement déjà abordés avec le ballon Karma, et de commande de vol asservie sur des éléments au sol (travaux de thèse de Panos Theodorakopoulos). Les travaux concernant le vol en formation seront dans un premier temps réalisés grâce à une simulation hybride[65], qui met en jeu des avions simulés et le drone, et ultérieurement avec plusieurs drones.

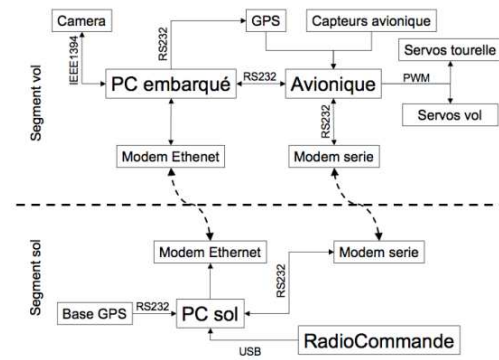


FIG. 1.34 – Le drone Lhasa lors de son vol de recette en Mai 2005, et architecture matérielle embarquée.

Chapitre 2

Prospective : robotique aéro-terrestre

Ma prospective de recherche s'appuie sur l'ensemble des travaux que j'ai menés depuis mon entrée au CNRS : elle reste centrée sur les deux grands thèmes de la modélisation de l'environnement et le contrôle des déplacements et des activités perceptuelles des robots. Mais ces deux thèmes se trouvent étendus par la considération du contexte plus ambitieux qu'est la robotique aéro-terrestre : il s'agit de donner à un ensemble de plateformes terrestres et aériennes les moyens de réaliser des missions complexes avec une intervention minimale des opérateurs. Ce contexte enrichit les thèmes de recherche, et soulève aussi de nouveaux problèmes encore très peu abordés dans la communauté robotique.

Après une brève présentation du contexte (section 2.1), cette partie précise mes deux axes de prospectives (sections 2.2 et 2.3) et les méthodes et moyens envisagés pour les réaliser (section 2.4).

2.1 Contexte : robotique aéro-terrestre

Objet. Par système robotique aéro-terrestre, nous entendons un ensemble de plateformes terrestres et aériennes évoluant en coopération afin de réaliser une mission donnée. De nombreux schémas de coopération peuvent être envisagés : il vont de l'assistance mutuelle (les robots terrestres exploitent des informations collectées par les robots aériens pour définir leurs déplacements, ou les robots terrestres fournissent un modèle précis de zones d'atterrissage aux robots aériens par exemple), à la réalisation de tâches conjointes, telle l'exploration coordonnée d'une région donnée de l'environnement.

Impacts applicatifs. La mise en œuvre de systèmes sans pilote se justifie pour des missions d'intervention en milieu hostile pour l'homme (zones urbaines de combat, contaminées ou lutte contre des incendies par exemple). Pour de telles missions, l'autonomie des engins, même si elle n'est pas totale, permet de libérer l'opérateur des tâches de télépilotage, des tâches routinières et des fonctions de sécurité du système exigeant une forte réactivité : une approche multi-engins offre bien sûr une plus grande redondance et une complémentarité des moyens d'action et de recueil d'informations.

Les contextes applicatifs sont nombreux, essentiellement dans les domaines de la défense (missions de logistique, de reconnaissance, voire de feu), de la sécurité civile (missions d'exploration, d'observation), et même de l'exploration planétaire.

Objectifs scientifiques. La mise en œuvre de tels systèmes requiert bien entendu le développement de travaux couvrant un très large spectre de la robotique, mais les objectifs scientifiques que j'affiche

dans ce contexte concernent principalement les deux thématiques de la construction de modèles de l'environnement et de la décision au sein du système multi-robots.

2.2 Aspects relatifs à la modélisation de l'environnement

La modélisation de l'environnement peut être la finalité de la mission des robots (cas de la robotique d'exploration), mais est surtout nécessaire à la prise des différentes décisions pour mener à bien les missions. Dans le contexte considéré, les sources d'informations pour réaliser les fonctions de modélisation sont les robots terrestres, les robots aériens et les informations initiales, telles que celles qui sont fournies par un système d'information géographique (figure 2.1). La variété de ces sources pose de nouveaux problèmes :

- L'intégration des données perçues par les robots terrestres et aérien est nécessaire : les informations relatives à l'environnement doivent être partagées entre les différents systèmes robotisés considérés, car ils *coopèrent*.
- De même, les informations initiales sur l'environnement, telles que celles fournies par l'imagerie satellite ou présentes dans un système d'information géographique existant par exemple, doivent être exploitées par les algorithmes de modélisation.

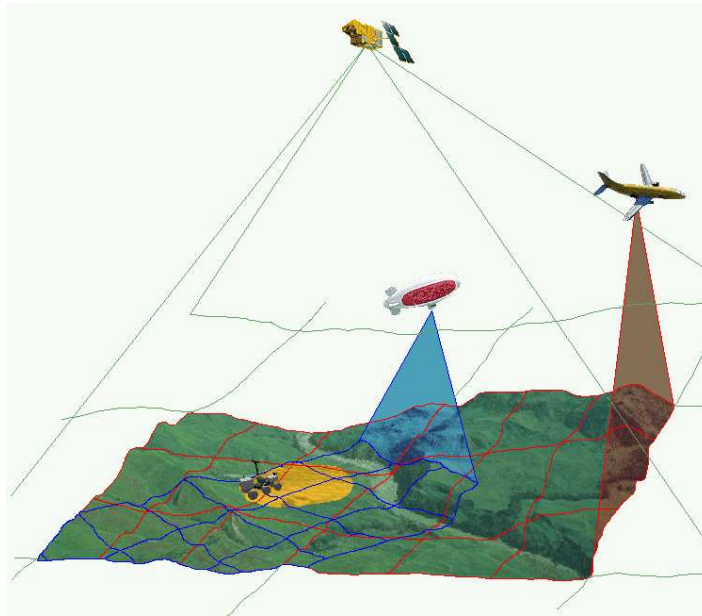


FIG. 2.1 – Illustration des différentes sources d'informations exploitées pour la construction de modèles de l'environnement dans un contexte de robotique aéro-terrestre : les satellites et avions de reconnaissance "classiques" (altitudes de quelques milliers de mètres) fournissent des informations initiales, intégrées au sein d'un système d'information géographique par exemple. Mais ces informations ne sont pas suffisamment précises pour être exploitées par un robot terrestre, et peuvent être obsolètes : en ligne, le déploiement de drones évoluant à basse altitude (ici un ballon dirigeable) et des robots terrestres permet de préciser et de mettre à jour ces informations.

La construction de modèles de l'environnement sur une grande échelle de temps et d'espace par un robot terrestre ou aérien est un problème encore très difficile, sur lequel il est nécessaire de poursuivre les travaux, particulièrement en ce qui concerne la localisation, la représentation de la géométrie et l'interprétation des scènes. De même, la fusion de données terrestres et aériennes en un seul modèle spatialement cohérent est une thématique encore très peu abordée, dont la résolution est indispensable

au déploiement coordonné de robots terrestres et aériens.

Besoins. Différents types modèles de l’environnement doivent être construits, selon le contexte de la mission et les besoins au niveau décisionnel : un modèle tridimensionnel est nécessaire à la planification des placements pour permettre des observations, un modèle de traversabilité est nécessaire à la planification des déplacements des robots terrestres, et des informations particulières sont nécessaires au contrôle de l’exécution des déplacements (figure 2.2). Le maintien de la cohérence spatiale de ces différents modèles implique bien entendu de poursuivre les travaux sur la localisation des robots, qui sont fortement liés aux processus de modélisation. La fusion des informations provenant des différentes sources et le développement de capacités d’interprétation des scènes modélisées sont aussi des thèmes importants, particulièrement pour passer de l’autonomie des déplacements à une réelle autonomie décisionnelle.

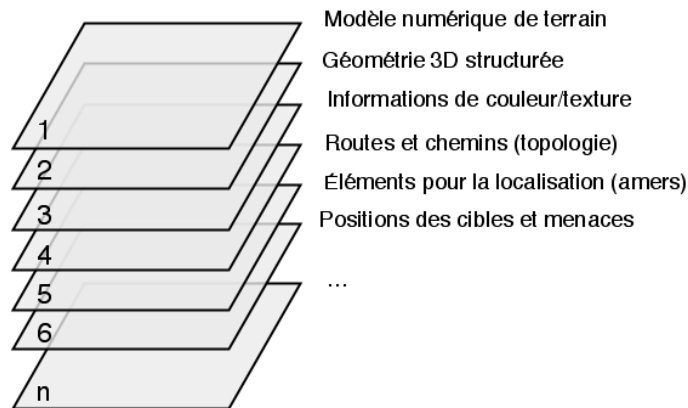


FIG. 2.2 – De manière analogue à un système d’information géographique, différentes “couches” constituent le modèle de l’environnement construit par le robot (certaines peuvent intégrer des informations initiales). C’est grâce à la localisation que la cohérence spatiale de chaque représentation et entre les différentes représentations est maintenue.

Objectifs scientifiques. Le problème de la localisation sur lequel j’ai déjà beaucoup contribué sera un des axes de travail majeur. En particulier, le problème de la cartographie et localisation simultanées (SLAM) sera étendu au cas multi-robots. Les robots ayant des capacités de perception très hétérogènes (types de capteurs embarqués et points de vue), il sera nécessaire de travailler sur l’enrichissement de la description des amers perçus afin de permettre leur mise en correspondance – particulièrement entre les données aériennes et les données terrestres.

Cet effort sur la partie “modélisation” du problème SLAM permettra aussi de développer des processus de construction de modèles de l’environnement plus riches qu’un modèle numérique de terrain ou une carte de traversabilité : en particulier, la production de modèles géométriques basés sur des primitives géométriques du premier ordre (droites et plans) sera privilégiée. Un tel modèle permet en effet d’explicitier les notions de visibilité, indispensables à la planification des activités perceptuelles des robots impliqués.

Enfin, des efforts seront mis sur la production de modèles exhibant des informations *sémantiques* : l’identification et la localisation d’objets particuliers présents dans l’environnement permet en effet des mises en correspondances aisées entre les robots impliqués et avec les informations analogues codées dans le système d’information géographique initial, et simplifie grandement les interactions entre les robots et les opérateurs.

Ces travaux se basent sur mes acquis dans le domaine, et font appel aux disciplines de traitement d'image et de signal, aux formalismes de fusion d'informations imprécises et incertaines, développés pour diverses modalités (vision couleur, panoramique, monoculaire, et stéréoscopique). Les modèles de l'environnement sont des modèles probabilistes, tant au niveau de la géométrie (imprécisions) qu'au niveau sémantique (incertitudes).

Les figures 2.3 et 2.4 montrent de tout récents résultats dans ce domaine obtenus par Thomas Lemaire et Sébastien Bosch.

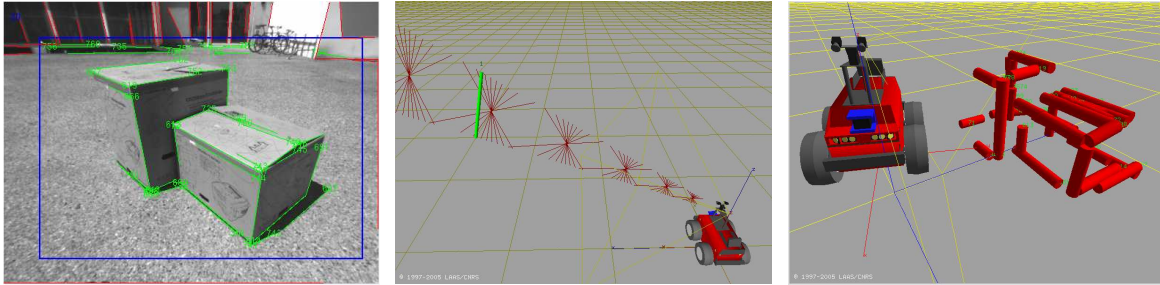


FIG. 2.3 – Résultat d'une technique de SLAM monoculaire basée sur les segments détectés dans les images. De gauche à droite : segments détectés dans une image, principe d'initialisation des amers, et résultat de la carte des amers produits. Cette carte constitue un bon squelette de modèle tridimensionnel.



FIG. 2.4 – Détection de zones planes dans une séquence d'images aériennes (les obstacles sont représentés en noir). Cette mosaïque permet de construire incrémentalement une représentation probabiliste de la traversabilité pour un robot terrestres, qui sera à terme fusionnée avec le modèle de traversabilité présenté figure 1.15.

2.3 Aspects décisionnels, coopération multi-robots

Le déploiement sûr de robots terrestres et aériens coopérant entre eux pose un ensemble de problèmes encore difficiles. Parmi les thèmes abordés dans ce contexte, l'intégration de la planification et du contrôle d'exécution et le partage des décisions avec les opérateurs sont des aspects qu'il est nécessaire de traiter avant d'envisager tout système opérationnel, et qui restent encore très ouverts.

Besoins. Le contrôle d'un robot distant par un opérateur n'est pas une tâche très aisée : *a fortiori*, le contrôle à distance d'un ensemble d'engins aux caractéristiques très différentes (capacités de déplacement et de perception) est encore plus complexe, et n'est pas simplifié par la multiplication des opérateurs, ceux-ci devant alors se coordonner en permanence. Le déploiement de systèmes robotiques aéro-terrestres impose donc le développement de capacités décisionnelles embarquées. Par ailleurs, la considération de contraintes réalistes sur les communications entre les engins, qui sont intermittentes et limitées, requiert la possibilité de distribuer les différents processus fonctionnels et décisionnels. Mais cela n'exclut pas d'avoir une composante centralisée, notamment parce que la présence des opérateurs sera toujours indispensable (voire obligatoire) dans tous les contextes applicatifs considérés.

Objectifs scientifiques. La problématique est ici très large : elle implique le développement d'algorithmes de coopération entre machines aux capacités de déplacement et de perception très hétérogènes, et d'un concept d'organisation (architecture décisionnelle), qui doit permettre à la fois la coopération entre différents robots, le partage de décision avec un opérateur et l'intégration de la planification et du contrôle d'exécution.

Dans ce vaste domaine, j'envisage plus précisément de contribuer à introduire aux sein des niveaux décisionnels des raisonnements sur les modèles de l'environnement construits et sur les capacités de perception des robots, notamment dans le contexte de la théorie de la décision. Ces informations sont en effet indispensables aux prises de décision concernant les mouvements : planification des placements et des déplacements, et sélection, supervision et contrôle de l'exécution de différentes modalités de déplacements. Bien entendu, le contexte multi-robots hétérogènes enrichit grandement ces problématiques.

2.4 Méthodes et moyens

Ces travaux seront menés selon une approche constructive et intégrative : il s'agit de concevoir des solutions en considérant qu'elles font partie d'un système, et de les intégrer à bord de plateformes expérimentales afin de les évaluer dans des scénarios réalistes – ce qui imposera vraisemblablement de développer de nouvelles plateformes.

Bien entendu, ces travaux seront déclinés dans différentes activités collaboratives, certaines ayant déjà été mises en place (ainsi le projet du PIR Robea "Acrobate : algorithmes pour la coopération entre robots aériens et terrestres" qui s'achèvera mi-2006, et la collaboration avec Thalès lors de la spécification du PEA Cadence, qui débouchera peut-être sur un projet d'ampleur).

Annexe A

Curriculum Vitæ

Diplômes et titres

- **programmé en Avril 2006** : Habilitation à diriger les recherches de l'Institut National Polytechnique de Toulouse
- **1995** : Doctorat en Informatique de l'Université Paul Sabatier, spécialité Robotique :
"Stratégies de Perception et de Déplacement pour la Navigation d'un Robot Mobile Autonome en Environnement Naturel", sous la direction de Raja Chatila. Mention très honorable avec félicitations du jury.
- **1991** : Diplôme d'Études Approfondies de l'Université Paul Sabatier, spécialité Intelligence Artificielle :
"Choix de capteur et de point de vue pour une machine de perception multi-sensorielle", sous la direction de Malik Ghallab.
- **1990** : Diplôme d'Ingénieur de l'École Centrale de Paris, spécialité Robotique

Cursus Professionnel

- 1er Octobre 1999 : Passage CR2 → CR1
- 1er Février 1996 : Entrée au CNRS
- Février 1995 - Janvier 1996 : Séjour Post-Doctoral au "Center for Intelligent Machines" de l'Université McGill, Montréal.
- Septembre 1991 - Mars 1995 : Préparation du doctorat au LAAS, groupe Robotique et Intelligence Artificielle
- Septembre 1990 - Août 1991 : Préparation du DEA au LAAS, groupe Robotique et Intelligence Artificielle

Thèmes de recherche

Robotique mobile autonome en environnements extérieurs : perception et modélisation de l'environnement, contrôle des activités perceptuelles, génération et contrôle des déplacements, stratégies de navigation, coopération entre robots terrestres et aériens.

Annexe B

Autres activités

B.1 Activités d’encadrement

B.1.1 Encadrement de thèses

L’ensemble de thèses que j’ai encadrées et que j’encadre sont les suivantes (par ordre chronologique inverse) :

- Thèse de Panos Theodorakopoulos, depuis Octobre 2005 (co-encadrement avec Raja Chatila, bourse de Grèce) : “Contrôle du vol d’un drone pour le suivi de cibles mobiles terrestres”.
- Thèse de Sylvain Joyeux, depuis Octobre 2004 (en co-encadrement avec Rachid Alami, bourse DGA) : “Architecture et algorithmes pour la coopération entre robots terrestres et aériens”.
- Thèse de Gautier Hattenberger, depuis Octobre 2004 (en co-encadrement avec Rachid Alami, bourse BDI co-financée par Dassault Aviation) : “Algorithmes de décision distribués pour le vol en formation de drones”.
- Thèse de Thomas Lemaire, depuis Octobre 2003 (encadrement à 100 %, bourse DGA) : “Cartographie et Localisation Simultanées entre robots terrestres et aériens”.
- Thèse de Sébastien Bosch, depuis Octobre 2003 (encadrement à 100 %, financement sur budget propre) : “Modélisation de l’environnement à partir d’images aériennes acquises à basse altitude”.
- Thèse de Leonardo Solaque (à partir d’Octobre 2003, en co-tutelle avec l’université de Bogota. Encadrement à 100 % durant deux séjours de 10 mois au LAAS, financement de Colombie) : “Contrôle de vol d’un ballon dirigeable”. Leonardo soutiendra sa thèse à Bogota mi-2006.
- Thèse de Thierry Peynot, depuis Octobre 2002 (encadrement à 100 %, bourse MENRT) : “Supervision de la navigation d’un robot terrestre dotés de plusieurs modes de déplacement”.
- Thèse de Jérémie Gancet, depuis Septembre 2001, soutenue le 29/09/2005 (en co-encadrement avec Rachid Alami, bourse BDI) : “Schémas de coopération multi-robots en environnements naturels”. Jérémie Gancet travaille maintenant dans la société Space Applications Services à Bruxelles (Belgique).
- Thèse de Joël Gonzalez, depuis Septembre 2000, soutenue le 26/01/2004 (encadrement à 100 %, bourse du Mexique) : “Vision Panoramique pour la robotique mobile : stéréovision et localisation par indexation d’images”. Après une année passée à enseigner à l’Université de Guanajuato (Mexique), Joël Gonzalez travaille maintenant dans un centre de recherche à Queretaro (Mexique).
- Thèse d’Il-Kyun Jung, depuis Septembre 2000, soutenue le 02/03/2004 (encadrement à 100 %, financement sur budget propre) : “Cartographie et localisation simultanées à partir de stéréo-

vi-sion”. Il-Kyun Jung travaille maintenant dans la société LG à Séoul (Corée du Sud), sur un projet de robotique personnelle.

- Thèse d’Anthony Mallet, depuis Septembre 1997, soutenue le 02/07/2001 (encadrement à 100 %, bourse BDI co-financée par Aérospatiale) : “Localisation d’un robot mobile autonome en environnements naturels : Méthodes et intégration”. Après un post-doc à l’EPFL (Suisse), Anthony Mallet travaille maintenant dans la société Seanodes, à Toulouse.
- Thèse d’Hassan Haddad, depuis Mars 1996, soutenue le 05/11/1998, encadrement à 100 % bourse de Syrie) : “Génération de mouvement avec évitement d’obstacles pour un robot mobile dans un milieu naturel”. Hassan Haddad est maintenant enseignant chercheur à Damas (Syrie).

B.1.2 Encadrement de DEA et stages de fin d’études

Par ordre chronologique inverse, les stages que j’ai encadrés sont les suivants :

- Printemps 2005 : stage de DEA de Panos Theodorakopoulos (“Contrôle du vol d’un drone pour le suivi de cibles mobiles terrestres”).
- Printemps 2005 : stage de DEA et de fin d’étude de l’École Centrale de Paris de Cyrille Berger (“Construction d’un modèle 3D de l’environnement pour la localisation d’un robot mobile”).
- Automne 2004 - Hiver 2005 : stage de Niko Suenderhauf, étudiant en Mastère à l’Université de Chemnitz (Allemagne). Travaux sur l’estimation visuelle du mouvement.
- Automne 2004 : stage de Diego Patino, en mastère à l’Université de Bogota (Colombie). Travaux sur l’identification des paramètres aérodynamiques d’un ballon dirigeable.
- Printemps 2003. Encadrement du stage de 2^{de} année de SupAéro d’Andreas Arnold-Bos (“Cartographie haute résolution et localisation simultanée par vision monoculaire à bord du dirigeable Karma”).
- Printemps 2003 : stage de DEA de Thomas Lemaire (“Coopération multi-robots : approche distribuée pour l’allocation et la planification de tâches”).
- Printemps 2003 : stage de fin d’études de l’ENSEA de Bertrand Chabaud (“Mise en correspondance d’images aériennes acquises à différentes altitudes”).
- Printemps 2003 : stage de DEA de Sébastien Bosch (“Estimation et détection de régions en mouvement dans des séquences d’images aériennes”).
- Printemps 2002 : stage de fin d’études de l’École Supérieure de l’Énergie et des Matériaux d’Arnaud Jacquet (“Développement d’une couche fonctionnelle pour un ballon dirigeable autonome”).
- Printemps 2002 : stage de fin d’études de l’Indian Institute of Technology of Varanasi de Salil Jain (“Mise en correspondance d’images acquises à différentes altitudes”).
- Printemps 2002 : stage de DEA de Thierry Peynot et de fin d’étude de l’ENSEEIH (“Contrôle de locomotion d’un robot en terrains accidentés”).
- Printemps 2001 : stage de DEA de Gaël Scot (“Stratégies d’exploration multi-robots”).
- Printemps 2000 : stage de DEA d’Il-Kyun Jung (“Mise en correspondance de points d’intérêts”).
- Printemps 2000 : stage de DEA de Joël Gonzalez (“Reconnaissance d’objets en environnement naturels à l’aide de techniques d’indexation d’images”).
- Printemps 2000 : stage de fin d’études de l’X-ENSTA de Gaël Scot (“Technique d’estimation visuelle du mouvement d’un robot en environnement naturel”).
- Printemps 2000 : stage de DEA de David Bonnafous (“Génération de déplacements en terrains accidentés”, et co-encadrement avec Nicolas Siméon).
- Printemps 1999 : stage de DEA d’Emmanuel Hygounenc (“Localisation 3D d’un robot mobile tout terrain grâce à ses capteurs proprioceptifs”).

- Printemps 1999 : stage de DEA de Nadia Lasri (“Reconnaissance d’objets non structurés par indexation d’images”)
- Printemps 1998 : stage de DEA de Georges Soto Romero (“Interprétation d’images de réflectance”)
- Printemps 1997 : stage de DEA d’Anthony Mallet (“Modélisation d’Amers pour de Robots Mobiles Autonomes en vue de la Localisation en Environnement Non-structuré”)

B.1.3 Autres encadrements

J’ai encadré le séjour post-doctoral des étudiants suivants :

- Post-Doctorat de Martial Sanfourche (doctorat obtenu à l’Onera/DTIM), depuis le 01/01/2006 et jusqu’au 01/07/2007 (encadrement à 100 %) : “Modélisation d’environnement à partir d’images panoramiques aériennes”.
- Post-Doctorat de Pierre Lamon (doctorat obtenu à l’EPFL), du 01/12/2004 au 30/11/2005 (encadrement à 100 %) : “Intégration d’algorithmes de localisation décentralisés”..

J’ai aussi encadré le séjour au laboratoire de quelques étudiants en thèse dans des laboratoires étrangers :

- Automne 2005 - Hiver 2006 : séjour de Fernando Caballero, doctorant à l’Université de Séville (Espagne). Travaux sur la construction de mosaïques à partir d’images aériennes.
- De Juin à Août 2001 : co-encadrement (avec Florent Lamiroux) des travaux de Cristian Dima, doctorant du Robotics Institute de l’Université Carnegie Mellon à Pittsburgh (États-Unis), portant sur l’amélioration de la stéréovision par corrélation de pixels en environnements intérieurs.
- D’Octobre 1999 à Avril 2000 : encadrement des travaux de Mauro Di Marco, doctorant de l’université de Florence (Italie), portant sur l’adaptation de techniques d’estimations ensemblistes à la localisation d’un robot et à la construction de cartes d’amers.
- D’avril 1999 à Août 1999 : encadrement des travaux de Vandi Verma, doctorante du Robotics Institute de l’Université Carnegie Mellon à Pittsburgh (États-Unis), portant sur l’étude de représentations de modèles numériques de terrain par des ondelettes, dans le but d’effectuer des mises en correspondance avec des modèles de résolution très différentes.

Enfin, j’ai encadré de Septembre 2002 à Juillet 2003 les travaux d’Arnaud Jacquet, ingénieur en CDD au laboratoire (“Développement et instrumentation d’un ballon dirigeable autonome”).

B.2 Collaborations académiques

B.2.1 Collaborations informelles

Hormis dans le cadre de projets (nationaux essentiellement), je maintiens des liens avec différents laboratoires de robotique. Les actions les plus concrètes liés à ces collaborations sont essentiellement des courts séjours de doctorants que j'encadre, et l'accueil de doctorants au sein du groupe RIA. Les principales collaborations académiques auxquelles je participe sont les suivantes :

Collaboration avec l'Université de Sydney Depuis un soutien de la Direction des Relations Internationales du CNRS en 2001 qui a permis au doctorant Il-Kyun Jung de passer 6 semaines à Sydney, je maintiens d'excellents contacts avec l'Australian Center for Field Robotics (visites, échanges de données, montage de projets auprès du ministère des affaires étrangères - qui ont malheureusement été infructueux).

Collaboration avec l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne J'ai transféré quelques logiciels dans le cadre du doctorat de Pierre Lamon (dont j'ai rapporté sur la thèse et qui a effectué un postDoc sous ma direction en 2005), et Anthony Mallet y a effectué un post-doctorat en 2004.

Collaboration avec l'Université de Linköping Nous entretenons de bonnes relations avec le département Computer and Information Science de l'Université (qui était un des partenaires du projet Comets, et qui a notamment mené le projet Witas) : ainsi le doctorant Jérémie Gancet y a effectué un séjour de 2 mois pendant l'été 2004.

Collaboration avec la Nasa Ames Ce centre de la Nasa étudie essentiellement les aspects décisionnels posés par la navigation autonome d'un robot dans un contexte d'exploration planétaire, et plus particulièrement les problèmes liés à la coopération entre explorateurs humains et robots. Des liens forts entre le groupe et ce laboratoire existent depuis quelques années, notamment grâce à mon collègue Félix Ingrand. Dans ce contexte, le doctorant Thierry Peynot a passé un séjour de 3 mois à Ames Reseach Center (été 2005), pendant lesquels il a porté et adapté l'ensemble des algorithmes de navigation de Dala à bord d'un robot.

Collaboration avec l'Onera Le département "Commande des Systèmes et Dynamique du vol" a initié un projet fédérateur interne à l'Onera ("Recherche et sauvetage par un système autonome coopérant"), qui porte sur de nombreux aspects très proche de mes travaux (modélisation de l'environnement survolé et aspect décisionnels). Nous nous sommes donc rapproché de ces collègues, et sommes en train de bâtir un projet de laboratoire commun, qui nous permettra notamment de répondre ensemble à des appels d'offre.

B.2.2 Collaborations dans le cadre de projets

Projet de l'ANR "Caviar" Depuis Janvier 2006, je suis le responsable au LAAS du projet "Cata-dioptric Vision for Aerial Robots", mené par le CREA d'Amiens, en collaboration avec les équipes Icare et Gravir de l'INRIA et le LE2I de l'Université de Bourgogne (budget total : 450 KEuros, budget pour le LAAS : 90 KEuros, je suis le seul permanent du groupe impliqué). Dans ce projet, nous contribuerons sur les problèmes de modélisation de l'environnement à partir de vision panoramique aérienne.

Projet du PIR Robea “Acrobate” Depuis Juillet 2003 et jusqu’à Mars 2006, j’anime le projet du PIR Robea “Acrobate : Algorithmes pour la Coopération entre Robots Aériens et Terrestres”, collaboration avec le département DCSD de l’Onera et le centre d’Arcueil de la DGA (budget total : 80 KEuros, budget pour le LAAS : 40 KEuros, je suis le seul permanent du groupe impliqué).

Dans le contexte de ce projet, les éléments suivants sont étudiés :

- Approches SLAM multi-robots, et développement de fonctions de perception permettant de mettre en correspondances des éléments perçus par les robots terrestres et aériens.
- Algorithmes et architecture décisionnelle pour la coopération multi-robots.

Projet du PIR Robea “R2M” Depuis Juillet 2003 et jusqu’à Mars 2006, je participe au projet du PIR Robea “R2M : Rover multi-modes pour une haute mobilité sur terrain accidenté” animé par le LASMEA (Clermond Ferrand), en collaboration avec le Cemagref (Clermond Ferrand) et le Laboratoire de Robotique de Paris (budget total : 136 kEuros, budget pour le LAAS : 33 kEuros, je suis le seul permanent du groupe impliqué).

Ce projet porte sur l’étude de la locomotion en terrains accidentés, pour une plate-forme développée au Laboratoire de Robotique de Paris. Au LAAS, les aspects suivants sont étudiés :

- Fusion d’informations de texture aux informations de texture pour la modélisation du terrain,
- Et surveillance de la locomotion, en intégrant des informations a priori et des informations mesurées lors des déplacements.

Projet du PIR Robea “Aerob” De Septembre 2001 à Mars 2005, j’ai animé le projet du PIR Robea “Aerob : Robots mobiles terrestres et aériens en environnements extérieurs : Modélisation de l’environnement et navigation sûre basée sur la vision”, collaboration avec l’équipe ICARE de l’INRIA Sophia et le Centre d’Études Spatiales de la Biosphère à Toulouse (budget total : 900 KF, budget pour le LAAS : 330 KF, j’étais le seul permanent du groupe impliqué).

Ce projet a consisté à étudier les problèmes suivants :

1. Intégration de données aériennes acquises à différentes altitudes (images et modèles numériques acquis par satellites, avions, et systèmes à très basse altitude).
2. Construction de modèles de l’environnement très haute résolution (quelques centimètres) à partir de données acquises à très basse altitude.
3. Recalage et fusion de données aériennes et terrestres.
4. Planification de chemins à partir du modèle construit, en spécifiant le modèle de l’exécution asservie des déplacements.
5. Asservissement visuel des déplacements, en exploitant des images non calibrées et le modèle tridimensionnel construit.

De notre côté, les principaux résultats ont été obtenus sur le point 3.

Projet du GdR Isis “Vision Panoramique et Robotique” De mars 2002 à Juin 2003, j’ai animé le projet jeunes chercheurs du GdR ISIS “Vision panoramique et robotique”, collaboration avec le LISIF de l’Université Pierre et Marie Curie et le CREA de l’Université de Picardie (budget total : 7500 Euros, budget pour le LAAS : 2500 Euros, j’étais le seul permanent du groupe impliqué).

Ce petit projet a consisté à étudier et définir des méthodes de calibrage de caméras panoramiques. Il s’est conclu le 05/06/2003 par l’organisation à l’ENST d’une journée du GdR Isis consacrée à la vision panoramique, à laquelle 20 personnes étaient présentes.

Action stratégique “Machines intelligentes” du CNRS De 1996 à 1999, j’ai assuré avec Raja Chatila l’animation du pôle Robotique d’Intervention (RISC) de l’action stratégique “Machines Intelligentes” du CNRS (pas de financement spécifique).

B.3 Activités contractuelles

Par ordre chronologique inverse, l'ensemble des activités contractuelles que j'ai menées depuis mon entrée au CNRS sont les suivantes :

- Responsable du contrat avec le CNES "Localisation par vision d'un robot d'exploration planétaire de type mission ExoMars" (de Juin 2005 à Juin 2006, budget de 35 kEuros pour le Laas). Il s'agit d'améliorer des techniques d'estimation visuelle du mouvement développées au LAAS et d'assurer leur transfert vers le CNES.

Je suis le seul permanent du groupe impliqué dans ce contrat.

- Responsable au LAAS du contrat avec l'ESA "ExoMars phase A study : rover design and trade-offs" (de Janvier 2004 à Janvier 2005, budget de 20 kEuros pour le LAAS). Au sein du consortium mené par Astrium UK, j'avais la responsabilité la spécification de la couche logicielle assurant la navigation du futur rover ExoMars que l'ESA prévoit de lancer sur Mars en 2011. Ce contrat a demandé énormément de travail (bien plus que le budget alloué au Laas...), et nous devrions être acteurs des phases suivantes du projet dès le début 2006.

J'étais le seul permanent du groupe impliqué dans ce contrat.

- Responsable au LAAS du projet Européen IST Comets "Real time control and coordination of multiple heterogeneous unmanned aerial vehicles" (de Mai 2002 à Juin 2005, budget total de 1.5 Meuros, dont 330 kEuros pour le LAAS). Il s'agissait d'un projet très ambitieux mené par l'Université de Seville, en collaboration avec l'Université Technique de Berlin, la société espagnole GMV et l'Université de Linköping, qui a mené chaque année à une semaine d'expérimentations au Portugal, durant lesquelles le ballon dirigeable Karma a été exploité en coopération avec deux hélicoptères apportés par des partenaires. Au sein de ce projet, nous avons investi dans les axes suivants :

- Développement du ballon dirigeable Karma
- Développement du contrôle de vol de Karma
- Développement de fonctionnalités de modélisation de l'environnement survolé
- Spécification et développement de l'architecture globale de l'ensemble du système Comets : spécification et écriture des superviseurs associés à chacun des robots et interfaçage avec la station de contrôle au sol.

Ce très gros projet nous a permis de développer une compétence en robotique aérienne et de renforcer des acquis dans le domaine multi-robots.

Les autres permanents du groupe impliqués dans ce projet étaient Rachid Alami et Raja Chatila.

- Responsable au Laas du contrat avec Dassault "Réalisation d'une plate-forme générique d'expérimentation en vue de l'étude de problèmes de coopération de véhicules aériens" (de Janvier 2004 à Décembre 2005, budget pour le LAAS de 45 kEuros). Il s'agissait de spécifier et développer le drone Lhassa. J'étais le seul permanent du groupe impliqué.

- PEA Cadence : responsable au LAAS du Programme d'Études Amont de la DGA CADENCE, auprès de Thales (de Janvier 2004 à Janvier 2005, budget pour le LAAS de 20 kEuros). Il s'agissait de participer à la spécification de concepts de systèmes robotisés terrestres et aériens pour des applications de défense. Ce PEA a pour l'instant été gelé par la DGA.

Les autres permanents du groupe impliqués étaient Rachid Alami, Raja Chatila, Michel Devy et Félix Ingrand.

- PEA Miniroc : participant au LAAS du Programme d'Études Amont de la DGA MiniRoc, auprès de Thales (de Janvier 2002 à Janvier 2003, budget pour le LAAS de 20 kEuros). Il s'agissait de participer à la spécification de concepts de systèmes robotisés terrestres pour des applications de défense. Le groupement qui a obtenu la réalisation des études n'est pas celui

qui a été mené par Thales.

Les autres permanents du groupe impliqués étaient Rachid Alami, Raja Chatila, Michel Devy et Félix Ingrand.

- Responsable du projet soutenu par la région Midi-Pyrénées “Robotique d’Exploration et d’Intervention” (de 2001 à 2003 inclus, subvention totale de 750 kF, part LAAS de 450 kF). En collaboration avec l’Onera, ce projet nous a permis de faire nos premiers pas en robotique aérienne, notamment en apportant le soutien nécessaire au développement du ballon dirigeable Karma.

J’étais le seul permanent du groupe impliqué.

- Co-responsable avec Michel Devy de la participation au programme de la DGA “Acquisition de programmes de traitement d’images pour la navigation de véhicules robotisés” (en 2002, budget pour le LAAS de 50 kF). Il s’agissait d’assurer le transfert de logiciels de traitement d’image développés au LAAS en vue de leur évaluation par la DGA.
- Responsable du contrat avec le CNES “Estimation visuelle du mouvement d’un rover” (2001, budget de 200 kF pour le Laas). Il s’agissait de transférer d’améliorer une technique d’estimation visuelle du mouvement développée au LAAS.

J’étais le seul permanent du groupe impliqué dans ce contrat.

- Co-responsable avec Raja Chatila du projet soutenu par la région Midi-Pyrénées “Robots d’Assistance et d’Intervention en Conditions Extrêmes” (de 1997 à 1999 inclus, subvention pour le LAAS de 250 kF). Ce projet nous a permis de faire de continuer à développer notre approche de la navigation pour un rover en environnements naturels.
- Responsable d’une étude pour l’Aérospatiale sur le problème de la localisation d’un robot en environnements naturels (1998, budget de 50 kF pour le LAAS).

J’étais le seul permanent du groupe impliqué dans ce contrat.

Enfin, bien qu’il ne s’agisse pas d’une activité contractuelle, j’ai participé durant toute l’année 2005 à un club de réflexion animé par le CHEAr (Centre des Hautes Etudes de l’Armement de la DGA), dont l’objectif a été de produire un rapport intitulé “Quelles recherches en robotique pour les applications futures de la Défense à l’horizon post 2015 ?”.

B.4 Activités d'évaluation

B.4.1 Evaluation de thèses

J'ai rapporté sur les thèses suivantes :

- 2005 : thèse Juan Nieto (Australian Center for Field Robotics, University of Sydney) : “Detailed Environment Representation for the SLAM problem”
- 2004 : thèse de Pierre Lamon (Autonomous Systems Laboratory, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) : “3D Position Tracking for All-Terrain Robots”
- 2004 : thèse de Jong Huyk Kim (Australian Center for Field Robotics, University of Sydney) : “Autonomous Navigation for Airborne Applications”
- 2002 : thèse de Salah Sukkarieh (Australian Center for Field Robotics, University of Sydney) : “Aided Inertial Navigation Systems for Autonomous Land Vehicles”

J'ai participé au jury de thèse des étudiants suivants (outre les thèses que j'ai encadrées au LAAS) :

- Avril 2005 : thèse de Martial Sanfourche (Onera et Université Cergy) : “Traitement de séquences d'images pour l'estimation jointe de la structure et du mouvement. Application à l'imagerie aérienne.”
- Décembre 2004 : thèse de Pierre Lamon (Autonomous Systems Lab, École Polytechnique Fédérale de Lausanne) : “3D position tracking for all-terrain robots”
- Décembre 2001 : thèse de Nicolas Loménie (Université René Descartes, Paris) : “Interprétation de nuages de points : application à la modélisation d'environnements 3D en robotique mobile”.

B.4.2 Évaluation de projets

- Évaluation en 2005 de deux projets déposés auprès de l'ANR.
- Depuis 2004, membre du conseil scientifique du projet Ressac (“Recherche et sauvetage par un système autonome coopérant”) de l'Onera.
- Évaluation en 2003 de deux projets déposés dans le cadre du Programme Interdisciplinaire de Recherches du CNRS “Robea”.

Évaluation d'articles

- Évaluateur régulier pour différentes conférences internationales et nationales (IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, International Joint Conference on Artificial Intelligence, International Conference on Advanced Robotics, Robotics and Science, Field and Service Robotics, ...)
- Évaluation d'une cinquantaine d'articles pour les revues “Journal of Field Robotics”, “IEEE Transactions on Robotics and Automation”, “IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics”, “International Journal of Robotics Research”, “Traitement du Signal”, “Artificial Intelligence”...
- Membre du comité éditorial de la revue “Journal of Field robotics”.

B.5 Activités de diffusion de l'information scientifique

- Mise en place et maintien à jour d'un site web présentant le projet interne au laboratoire "Robotique en environnements naturels" (www.laas.fr/~\,simon/eden).
- Rédaction d'un article pour la revue "Géomatique" [102]
- Rédaction d'un article pour la revue "La Recherche" [103].
- Réalisation de vidéos présentant les travaux sur la navigation autonome avec le robot Lama [106, 105]. Réalisation d'autres vidéos non publiées (www.laas.fr/~simon/eden/gallery/videos.php), certaines sont hébergées sur le site du CNRS dans le dossier "sagaSciences" consacré à la robotique).
- Organisation de démonstrations en public de navigation autonome avec le robot Lama à la Cité de l'Espace de Toulouse, les 23 et 24 Septembre 2000, dans le cadre d'une exposition consacrée à la planète Mars.
- Présentation au public de communications sur la robotique en environnements naturels lors de diverses occasions (congrès de l'International Astronomical Foundation à Toulouse en Octobre 2001, cité de l'Espace en Septembre 2000, au "Salon International des Technologies du Futur" à Toulouse en 2000 et 1998...)
- Les travaux autour du robot Lama ont fait l'objet de trois émissions télévisées, de deux émissions de radio, et de différents articles dans la presse. Les travaux autour du ballon Karma ont fait l'objet d'un article dans la presse régionale, et ceux avec le drone Lhasa d'un article dans la presse Japonaise.

Annexe C

Liste exhaustive des publications

L'intégralité de mes publications depuis que je suis chercheur est présentée ici. Les publications sont classées par type, puis par ordre chronologique inverse.

Remarque : ne figurent pas dans les "chapitres dans des ouvrages" les publications présentées à des conférences, dont les actes sont ultérieurement édités (ainsi les actes de la conférence "International Symposium on Experimental Robotics" sont ultérieurement édités chez Springer, mais il ne s'agit pas à proprement parler d'une contribution à ouvrage. Les références de ce type sont [20, 25, 28, 37, 54, 60]).

Bibliographie

Chapitres dans des ouvrages

- [1] R. Chatila, F. Ingrand, and S. Lacroix. *Intelligence for Space Robotics*, chapter Autonomy of Planetary Rovers. TSI Press, 2006.
- [2] S. Lacroix, R. Chatila, and A. Mallet. *Images de profondeur*, chapter Images de profondeur et navigation autonome en environnement naturel, pages 215–242. Traités IC2. Hermes, 2002.

Publication dans des revues à comité de lecture

- [3] S. Lacroix, M. Devy, J. Sola and T. Lemaire. Modélisation 3D par vision pour la robotique mobile : approches de cartographie et localisation simultanées. *Bulletin de la société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, sous presse, 2006.
- [4] J-J. Gonzalez-Barbosa and S. Lacroix. Stéréovision panoramique dense : Calibrage précis et rectification d’images panoramiques. *Traitement du Signal*, 22(5), 2005.
- [5] A. Ollero and S. Lacroix et al. Multiple eyes in the sky : Architecture and perception issues in the comets unmanned air vehicles project. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 12(2) :46–57, June 2005.
- [6] E. Hygounenc, I-K. Jung, P. Soueres, and S. Lacroix. The autonomous blimp project at LAAS/CNRS : achievements in flight control and terrain mapping. *International Journal of Robotics Research*, 23(4/5) :473–512, April/May 2004.
- [7] S. Lacroix. Fusion de données pour la modélisation d’environnements en robotique. *Bulletin de la société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, (169) :73–79, 2003.
- [8] S. Lacroix, Anthony Mallet, David Bonnafous, Gérard Bauzil, Sara Fleury, Matthieu Herrb, and Raja Chatila. Autonomous rover navigation on unknown terrains : Functions and integration. *International Journal of Robotics Research*, 21(10-11) :917–942, Oct-Nov. 2002.
- [9] S. Lacroix, I-K. Jung, and A. Mallet. Digital elevation map building with low altitude stereo imagery. *Robotics and Autonomous Systems*, 41(2-3) :119–127, November 2002.
- [10] M. Di Marco, A. Garulli, S. Lacroix, and A. Vicino. Set membership localization and mapping for autonomous navigation. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 11(7) :709–734, 2001.
- [11] R. Chatila, S. Lacroix, T. Siméon, and M. Herrb. Planetary exploration by a mobile robot : Mission teleprogramming and autonomous navigation. *Autonomous Robots Journal*, 2(4) :333–344, 1995.
- [12] M. Devy, R. Chatila, P. Fillatreau, S. Lacroix, and F. Nashashibi. On autonomous navigation in a natural environment. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 16 :5–16, 1994.

Conférences invitées

- [13] S. Lacroix. Air / ground robotics ensembles for risky applications. In *3rd International Symposium on MEXT DDT Rescue Robot project, Kobe (Japan)*, January 2005.

Publications dans des conférences avec comité de lecture

- [14] N. Suenderhauf, K. Konolidge, S. Lacroix, and P. Protzel. Visual odometry using sparse bundle adjustment on an autonomous outdoor vehicle. In *Autonome Mobile Systeme, Stuttgart (Germany)*, December 2005.
- [15] T. Peynot S. Lacroix. A probabilistic framework to monitor a multi-mode outdoor robot. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton (Canada)*, Aug. 2005.
- [16] T. Lemaire, S. Lacroix, and J. Sola. A practice bearing-only slam algorithm. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton (Canada)*, Aug. 2005.
- [17] J. Gancet, G. Hattenberger, R. Alami, and S. Lacroix. Task planning and control for a multi-uav system : architecture and algorithms. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton (Canada)*, Aug. 2005.
- [18] J. Gonzalez and S. Lacroix. Fast dense panoramic stereovision. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona (Spain)*, April 2005.
- [19] L. Solaque, A. Gauthier, and S. Lacroix. Modelamiento y control de un dirigible. In *6th Congreso Nacional Asociacion Colombiana de Automatica, Ibague (Colombie)*, Nov. 2004.
- [20] J. Gancet and S. Lacroix. Embedding heterogeneous levels of decisional autonomy in multi-robot systems. In *7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems, Toulouse (France)*, June 2004.
- [21] S. Lacroix and I-K. Jung. Simultaneous localization and mapping with stereovision. In *5th symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lisbon (Portugal)*, July 2004.
- [22] T. Lemaire, R. Alami, and S. Lacroix. A distributed tasks allocation scheme in multi-uav context. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA (USA)*, April 2004.
- [23] I-K. Jung and S. Lacroix. Cartographie haute résolution à partir d'images stéréoscopiques acquises à basses altitudes. In *14ème Congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle Toulouse, (France)*, Jan. 2004.
- [24] I-K. Jung and S. Lacroix. High resolution terrain mapping using low altitude aerial stereo imagery. In *International Conference on Computer Vision, Nice (France)*, Oct 2003.
- [25] I-K. Jung and S. Lacroix. High resolution terrain mapping using low altitude aerial stereo imagery. In *International Symposium on Robotics Research, Siena (Italy)*, Oct 2003.
- [26] T. Peynot and S. Lacroix. Enhanced locomotion control for a planetary rover. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas (USA)*, Oct. 2003.
- [27] J. Gancet and S. Lacroix. Pg2p : A perception-guided path planning approach for long range autonomous navigation in unknown natural environments. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas (USA)*, Oct. 2003.
- [28] S. Lacroix, I-K. Jung, P. Soueres, E. Hygounenc, and J-P. Berry. The autonomous blimp project of laas/cnrs - current status and research challenges. In B. Siciliano and P. Dario, editors, *Experimental Robotics VIII*, volume 5 of *Springer Tracts in Advanced Robotics*, pages 487–496. Springer, 2003.
- [29] S. Lacroix and I-K. Jung. High resolution terrain mapping with an autonomous blimp. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne (Switzerland)*, Oct. 2002.
- [30] J. Gonzalez and S. Lacroix. Localisation d'un robot mobile par indexation d'images. In *13ème Congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle Angers, (France)*, pages 587–595, Jan. 2002.
- [31] C. Dima and S. Lacroix. Using multiple disparity hypotheses for improved indoor stereo. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC (USA)*, May 2002.
- [32] J. Gonzalez and S. Lacroix. Rover localization in natural environments by indexing panoramic images. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC (USA)*, May 2002.
- [33] D. Bonnafous, S. Lacroix, and T. Siméon. Motion generation for a rover on rough terrains. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems, Maui, Hawaii (USA)*, Oct. 2001.
- [34] S. Lacroix, I-K. Jung, and A. Mallet. Digital elevation map building with low altitude stereo imagery. In *9th International Symposium on Intelligent Robotic Systems, Toulouse (France)*, July 2001.
- [35] S. Lacroix, I-K. Jung, A. Mallet, and R. Chatila. Towards cooperative air/ground robotics : issues related to environment modeling. In *10th International Conference on Advanced Robotics, Budapest (Hungary)*, pages 139–144, Aug. 2001.
- [36] S. Lacroix and A. Mallet. Integration of concurrent localization algorithms for a planetary rover. In *6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, June 2001.
- [37] S. Lacroix, A. Mallet, D. Bonnafous, G. Bauzil, S. Fleury, M. Herrb, and R. Chatila. Autonomous rover navigation on unknown terrains : Functions and integration. In D. Rus and S. Singh, editors, *Experimental Robotics VII*, volume 271 of *Lecture Notes in Computer and Information Science*, pages 501–510. Springer, 2001.

- [38] E. Hygounenc, P. Soueres, and S. Lacroix. Developments on autonomous airship control at LAAS/CNRS. In *14th AIAA Lighter-Than-Air Systems Convention and Exhibition, Akron, Ohio (USA)*, July 2001.
- [39] I-K. Jung and S. Lacroix. A robust interest point matching algorithm. In *8th International Conference on Computer Vision, Vancouver (Canada)*, July 2001.
- [40] M. Di Marco, A. Garulli, S. Lacroix, and A. Vicino. A set theoretic approach to the simultaneous localization and map building problem. In *39th IEEE Conference on Decision and Control, Sydney (Australia)*, Dec. 2000.
- [41] A. Mallet, S. Lacroix, and L. Gallo. Position estimation in outdoor environments using pixel tracking and stereovision. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, Ca (USA)*, pages 3519–3524, April 2000.
- [42] N. Vandapel, R. Chatila, S.J. Moorehead, M. Hebert, S. Lacroix, M. Devy, D. Apostolopoulos, and W. Whittaker. Evaluation of computer vision algorithms for autonomous navigation in polar terrains. In *6th International Conference on Intelligent Autonomous Systems, Venice (Italy)*, July 2000.
- [43] J. Gonzalez and S. Lacroix. Landmark recognition to localize a cross-country mobile robot. In *International Symposium on Robotics and Automation, Monterey, NL (Mexico)*, Nov. 2000.
- [44] S. Lacroix, A. Mallet, and R. Chatila. Rover self localization in planetary-like environments. In *5th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Noordwijk (The Netherlands)*, June 1999.
- [45] R. Chatila, G. Andrade, S. Lacroix, and A. Mallet. Motion control for a planetary rover. In *2nd International Conference on Field and service Robotics, Pittsburgh, Pa (USA)*, Aug. 1999.
- [46] A. Mallet and S. Lacroix. Toward real-time 2d localization in outdoor environments. In *International Conference on Robotics and Automation, Leuven (Belgium)*, pages 2827–2832, May 1998.
- [47] J-J. Orteu, H. Al-Haddad, and S. Lacroix. Mesure de déformations 3d par stéréocorrélation. In *Congrès Photomécanique, Marne la Vallée (France)*, Avril 1998.
- [48] E. Piat and S. Lacroix. Hierarchical path planning on probabilistically labelled polygons. In *International Conference on Robotics and Automation, Leuven (Belgium)*, pages 3147–3152, May 1998.
- [49] H. Haddad, M. Khatib, S. Lacroix, and R. Chatila. Reactive navigation in outdoor environments using potential fields. In *International Conference on Robotics and Automation, Leuven (Belgium)*, pages 1232–1237, May 1998.
- [50] S. Lacroix and G. Dudek. On the identification of sonar features. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Grenoble (France)*, September 1997.
- [51] R. Chatila and S. Lacroix. A case study in machine intelligence : Adaptive autonomous space rovers. In A. Zelinsky, editor, *Field and service Robotics*, number XI in Lecture Notes in Control and Information Science. Springer, July 1998.
- [52] R. Chatila, S. Lacroix, M.Devy, and T.Simeon. Autonomous outdoor mobile robot navigation. The Eden project. In A. T. De Almeida and O. Khatib, editors, *Advance Research Workshop on Autonomous Robotic Systems, Coimbra (Portugal)*, June 1997, number 236 in Lecture Notes in Control and Information Sciences, pages 3–19. Springer, June 1998.
- [53] R. Chatila and S. Lacroix. Adaptive navigation for autonomous mobile robot. In *International Symposium on Robotics Research, Munich (Germany)*, October 1995.
- [54] S. Lacroix and R. Chatila. Motion and perception strategies for outdoor mobile robot navigation in unknown environments. In O. Khatib and J.K. Salisbury, editors, *Experimental Robotics IV*, volume 223 of *Lecture Notes in Computer and Information Science*, pages 538–547. Springer, 1995.
- [55] S. Lacroix, R. Chatila, S. Fleury, M. Herrb, and T. Siméon. Autonomous navigation in outdoor environment : Adaptive approach and experiments. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego, California (USA)*, May 1994.
- [56] M. Devy, R. Chatila, P. Fillatreau, S. Lacroix, and F. Nashashibi. On autonomous navigation in a natural environment. In *Proceedings of the Second International Workshop on Intelligent Robotic Systems, Grenoble (France)*, July 1994.
- [57] R. Chatila, M. Devy, S. Lacroix, and M. Herrb. Perception system and functions for autonomous navigation in a natural environment. In *Proceedings of the AIAA/NASA Conference on Intelligent Robots for Field, Factory, Service and Space, Houston, Texas (USA)*, March 1994.
- [58] R. Chatila, R. Alami, S. Lacroix, J. Perret, and C. Proust. Planet exploration by robots : from mission planning to autonomous navigation. In *1993 International Conference on Advanced Robotics, Tokyo (Japan)*, November 1993.
- [59] R. Chatila, M. Devy, M. Herrb, and S. Lacroix. Perception pour la navigation autonome en environnement naturel. In *Actes des 4èmes journées ORASIS du PRC-GDR Communication Homme-machine, Mulhouse (France)*, Septembre 1993.

- [60] R. Chatila, S. Fleury, M. Herrb, S. Lacroix, and C. Proust. Autonomous navigation in natural environment. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Experimental Robotics, Kyoto (Japan)*, October 1993.
- [61] M. Ghallab, P. Grandjean, S. Lacroix, and J.P. Thibault. Représentations et raisonnements pour une machine de perception multisensorielle. In *Actes des 4èmes Journées Nationales du PRC-GDR Intelligence Artificielle, Marseille (France)*, Octobre 1992.
- [62] S. Lacroix, P. Grandjean, and M. Ghallab. Perception planning for a multisensor interpretation machine. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice (France)*, May 1992.

Publications dans des conférences ou workshops sans comité de lecture (actes à diffusion limitée)

- [63] S. Lacroix. Ballons dirigeables autonomes. In *Journées Nationales de la Recherche en Robotique, Le Guidel (France)*, Oct. 2005.
- [64] D. Patino, L. Solaque, S. Lacroix, and A. Gauthier. Estimation of the aerodynamical parameters of an experimental airship. In *IEEE/RSJ IROS 2005 Workshop on Robot Vision for Space Applications, Edmonton, Alberta, Canada*, Aug. 2005.
- [65] S. Joyeux, A. Lampe, R. Alami, and S. Lacroix. Simulation in the LAAS architecture. In *Workshop on principle and practice of software development in robotics, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona (Spain)*, April 2005.
- [66] J. Gancet, G. Hattenberger, R. Alami, and S. Lacroix. Distributed decision in multi-uav systems : architecture and algorithms. In *Workshop on Cooperative Robotics, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona (Spain)*, April 2005.
- [67] N. Suenderhauf, K. Konolidge, T. Lemaire, and S. Lacroix. Comparison of stereovision odometry approaches. In *Workshop on Planetary Robotics, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona (Spain)*, April 2005.
- [68] J. Solà i Ortega, T. Lemaire, M. Devy, S. Lacroix, and A. Monin. Delayed vs undelayed landmark initialization for bearing only slam. In *SLAM Workshop, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona (Spain)*, April 2005.
- [69] S. Lacroix and I-K. Jung. High resolution 3d terrain mapping with low altitude imagery. In *8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation, Noordwijk (The Netherlands)*, Nov. 2004.
- [70] S. Lacroix. Robotics research issues for autonomous planetary rovers. In *2nd International Workshop on Planetary rovers, space robotics and Earth-based robots, St Petersburg (Russia)*, Oct. 2004.
- [71] S. Lacroix and R. Chatila. Air/ground robotic ensembles for risky applications. In *IARP workshop on Robotics and Mechanical assistance in Humanitarian Demining and similar risky interventions, Brussels (Belgium)*, June 2004.
- [72] S. Lacroix, I-K. Jung, J. Gancet, and J-J. Gonzalez-Barbosa. Towards long range autonomous navigation. In *7th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation, Noordwijk (The Netherlands)*, Nov. 2002.
- [73] I-K. Jung, S. Lacroix, , R. Chatila, and M. Devy. Simultaneous localisation and digital elevation map building from aerial stereo imagery. Wprkshop on Concurrent Mapping and Localization for Autonomous Mobile Robots - IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC (USA), May 2002.
- [74] E. Hygounenc, P. Soueres, and S. Lacroix. Trajectory tracking for autonomous blimb. In *4th International Airship Convention and Exhibition, Cambridge (UK)*, July 2002.
- [75] S. Lacroix. Towards autonomous airships : research and developments at laas/cnrs. In *3rd International Airship Convention and Exhibition, Friedrichshafen (Germany)*, July 2000.
- [76] S. Lacroix, A. Mallet, D. Bonnafous, S. Fleury, M. Di Marco, and R. Chatila. Autonomous long range navigation in planetary-like environments. In *6th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation, Noordwijk (The Netherlands)*, Dec. 2000.
- [77] S. Lacroix and R. Chatila. Pôle robotique d'intervention sur site non-coopératif. In *Deuxièmes Journées Nationales de la Recherche en Robotique*, Sept. 1999.
- [78] S. Gautama, S. Lacroix, and M. Devy. Evaluation of stereo matching algorithms for occupant detection. In *International Workshop on Recognition, Analysis and Tracking of Faces and Gestures in Real-Time Systems, Corfu (Greece)*, Sept. 1999.
- [79] S. Gautama, S. Lacroix, and M. Devy. On the performance of stereo matching algorithms. In *Workshop on Vision, Modelling and Visualization, Erlangen (Germany)*, Nov. 1999.

- [80] S. Lacroix. Results and research directions on autonomous navigation in natural environments. Workshop “Planetary Rovers”. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Grenoble (France), April 1996.
- [81] S. Lacroix. Perception et planification de tâches robotiques. In *1ère Journées Nationales de la Recherche en Robotique, Toulouse (France)*, Nov. 1997.
- [82] R. Chatila, S. Lacroix, S. Betge-Brezetz, M. Devy, and T. Siméon. Autonomous mobile robot navigation for planetary exploration : the eden project. Workshop WT1 “Planetary Rover Technology and Systems”. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota (USA), April 1996.
- [83] R. Chatila, R. Alami, S. Lacroix, J. Perret, and C. Proust. How to explore a planet with a mobile robot ? In *Proceedings of the IARP 2nd Workshop on Robotics in Space, Montréal (Canada)*, July 1994.
- [84] S. Lacroix and R. Chatila. A navigation strategy for autonomous planetary exploration. In *Proceedings of the IARP 2nd Workshop on Robotics in Space, Montréal, Québec (Canada)*, July 1994.
- [85] S. Lacroix, P. Phillatreau, F. Nashashibi, R. Chatila, and M. Devy. Perception for autonomous navigation in a natural environment. In *Proceedings of the First Workshop on Computer Vision for Space Applications, Antibes (France)*, September 1993.
- [86] S. Lacroix, P. Grandjean, M. Ghallab, and E. Dekneuveil. Control of a multi-sensory perception machine. In *Proceedings of the IARP 2nd Workshop on Multi-Sensor Fusion and Environment Modelling, Oxford (UK)*, September 1991.

Rapports de contrats

Remarque : seuls sont mentionnés ici les rapports de contrats qui ont été déposés au service documentation du laboratoire. De *très nombreux* rapports n’y figurent pas (ainsi près d’une dizaine de livrables produits pendant le projet européen Comets).

- [87] S. Lacroix and G. Hattenberger. Réalisation d’une plate-forme générique d’expérimentation en vue de l’étude de problèmes de coopération de véhicules aériens. Rapport final du contrat Dassault 040021/CNRS, Nov. 2005.
- [88] S. Lacroix, M. Devy, E. Malis, P. Rives, F. Laporterie, and G. Flouzat. Aérob : Robots mobiles terrestres et aériens en environnements extérieurs : Modélisation de l’environnement et navigation sûre basée sur la vision. In *Troisièmes journées du programme Robea, Montpellier (France)*, Mars 2005.
- [89] P. Martinet, B. Thuilot, C. Bouzgarrou, J-C. Fauroux, M. Berducat, C. Cariou, F. Ben Amar, F. Plumet, C. Grand, G. Besson, T. Peynot, and S. Lacroix. R2m : Rover multi-modes pour une haute mobilité sur terrain accidenté. In *Troisièmes journées du programme Robea, Montpellier (France)*, Mars 2005.
- [90] S. Lacroix, S. Joyeux, T. Lemaire, P. Fabiani, J-L. Farges, H. Belfy, D. Dufourd, and E. Moline. Acrobat : Algorithmes pour la coopération entre robots terrestres et aériens. In *Troisièmes journées du programme Robea, Montpellier (France)*, Mars 2005.
- [91] S. Lacroix. Réalisation d’une plate-forme générique d’expérimentation en vue de l’étude de problèmes de coopération de véhicules aériens. Rapport intermédiaire du contrat Dassault 040021/CNRS, Nov. 2004.
- [92] S. Lacroix, M. Devy, E. Malis, P. Rives, F. Laporterie, and G. Flouzat. Aérob : Robots mobiles terrestres et aériens en environnements extérieurs : Modélisation de l’environnement et navigation sûre basée sur la vision. In *Secondes journées du programme Robea, Toulouse (France)*, Jan. 2004.
- [93] S. Lacroix, J. Gonzalez, M. Mouaddib, P. Vasseur, J. Devars, and R. Benosman. Vision omnidirectionnelle et robotique. Rapport final du projet Jeunes Chercheurs P13 du GdR Isis, Mars 2004.
- [94] S. Lacroix, M. Devy, E. Malis, P. Rives, F. Laporterie, and G. Flouzat. Aérob : Robots mobiles terrestres et aériens en environnements extérieurs : Modélisation de l’environnement et navigation sûre basée sur la vision. In *Premières journées du programme Robea, Toulouse (France)*, Oct. 2002.
- [95] S. Lacroix and A. Mallet. Estimation visuelle du mouvement d’un rover. Technical report, Contrat CNES 713/2/00/0074, Novembre 2001.
- [96] R. Chatila, G. Andrade-Barroso, G. Bauzil, S. Fleury, M. Herrb, S. Lacroix, G.Scot, and N. Vandapel. Projet robots d’intervention en conditions extrêmes. Technical report, Rapport LAAS N. 01323 - Contrat Région Midi-Pyrénées RICE N 9609728 et 97002037, Août 2001.
- [97] R. Chatila, S. Lacroix, and N. Vandapel. Pré-étude des capteurs et du système de perception d’un robot mobile pour l’antarctique. Technical report, Rapport LAAS No97523 - Contrat IF RTP 97/02, Décembre 1997.
- [98] S. Lacroix and A. Mallet. Fusion de cartes de traversabilité pour la détection d’obstacles lors du déplacement d’un robot mobile. Technical report, Rapport LAAS N. 97508 - Contrat Aérospatiale 4500003199, Décembre 1997.

- [99] R. Chatila, S. Lacroix, J. Perret, G. Bauzil, C. Lemaire, and F. Ingrand. Projet robot mobiles d'intervention. Rapport LAAS 95573. Contrat Région Midi-Pyrénées 9307931, Décembre 1995.
- [100] S. Lacroix, T. Siméon, and R. Chatila. Stratégies de déplacement et de perception pour la navigation. Rapport LAAS 95540. Convention CNES, Projet IARES 896/CNES/93/0947/00, Décembre 1994.
- [101] R. Chatila, B. Dacre-Wright, M. Devy, S. Lacroix, F. Nashashibi, and T. Siméon. Génération des déplacements autonomes. Rapport LAAS 93537. Groupement RISP, Projet IARES, Décembre 1993.

Autres publications

- [102] S. Lacroix, M. Devy, E. Mails, P. Rives, F. Laporterie, and G. Flouzat. Modélisation de l'environnement par des robots terrestres et aériens. *Géomatique Expert*, pages 31–36, Mai-Juin 2004.
- [103] S. Lacroix and R. Chatila. S'orienter dans un monde inconnu. La Recherche, Février 2002.
- [104] S. Lacroix. Intelligence artificielle et robotique. *Bulletin de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) N. 27, (27)* :15–23, Novembre 1996.

Publications vidéos

- [105] S. Lacroix and A. Mallet. Autonomous navigation on planetary-like terrains. Video Proceeding of the SPIE Unmanned Ground Vehicle Technology conference, Orlando, Fl. (USA), April 2002.
- [106] S. Lacroix, H. Al Haddad, and M. Herrb. Reactive navigation in outdoor environments. Video proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, Mi (USA), May 1999.